ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria INŻYNIERIA ŚRODOWISKA z. 32 Nr kol. 979

Marian B. NANTKA

MATEMATYCZNE MODELE NATURALNYCH PROCESÓW WYMIANY POWIETRZA W BUDYNKACH MIESZKALNYCH

Streszczenie. Obliczanie ilości powietrza przepływającego przez budynki jest jednym z istotnych elementów zarówno ochrony cieplnej obiektów, jak i oceny skuteczności działania zastosowanych w nich systemów wentylacyjnych. W opracowaniu zestawiono i przeanalizowano podstawowe metody bilansowania przepływów powietrza w budynkach mieszkalnych. Przeprowadzone analizy umożliwiają wybór określonej metody w zależności od potrzeb i wymaganej dokładności ocen.

1. Mechanizm kształtowania przepływów powietrza

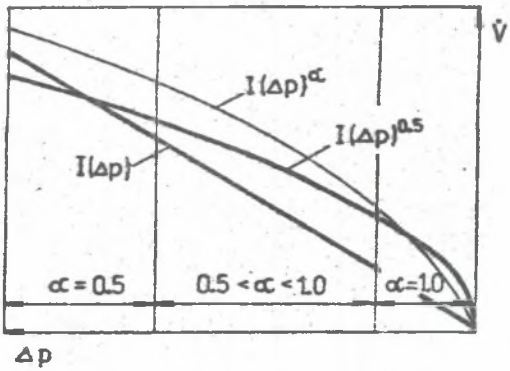
Każdy budynek mieszkalny składa się z określonej ilości pomieszczeń kontaktujących się pomiędzy sobą i z otoczeniem poprzez mniej lub bardziej szczelne dla powietrza przegrody oraz kanały wentylacyjne. Intensywność tego kontaktu zależy od dużej ilości jednocześnie oddziałujących czynników powodujących występowanie na przegrodach określonych różnic ciśnień. Wywołują one przepływ powietrza przez te przegrody i kanały wentylacyjne, przy czym ilości powietrza mogą być obliczone za pomocą zależności:

$$\dot{V} = I(\Delta p)^{\alpha}, \quad m^3/h \tag{1}$$

w której

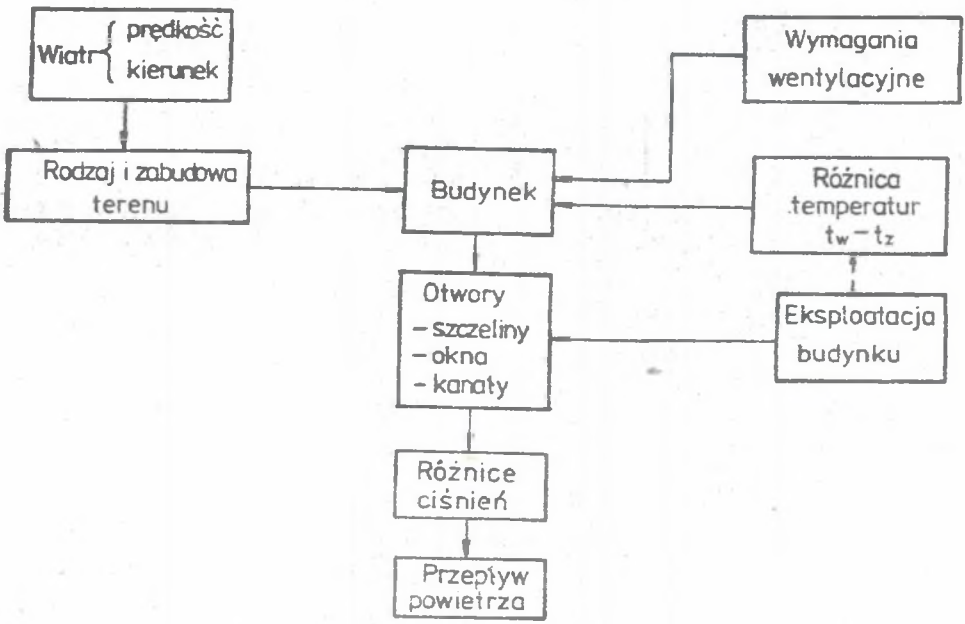
- I - jednostkowa ilość powietrza przepływająca przez dany element, m^3/h dla $\Delta p = 1$ daPa,
- Δp - różnica ciśnień po obu stronach danego elementu, daPa,
- α - wykładnik potęgowy ($0.5 < \alpha < 1.0$).

Charakter zależności (1) przedstawiono na rys. 1. Najistotniejsza jest uwikłana zależność wykładników "α" zarówno od różnicy ciśnień (charakteru ruchu powietrza), jak i tzw. współczynników przenikania powietrza, powiązanych z wartościami "I" poprzez sumaryczną długość lub powierzchnię rozważanego elementu. Występuje ona przede wszystkim przy analizowaniu procesów filtracji powietrza przez nieszczelności w przegrodach. Wartości "I" oraz "α" uzyskiwane są w trakcie badań różnych konstrukcji szczelin (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7).



Rys. 1. Charakter zależności ilości powietrza przenikającego przez szczeliny w przegrodach od różnicy ciśnień po obu stronach

Fig. 1. Character of the dependence between the quantity of the air penetrating through gaps in walls and pressure difference on both sides



Rys. 2. Kształtowanie się przepływów powietrza w budynkach
Fig. 2. Air flow distrubution in buildings

Zastosowanie zależności (1) do obliczeń wymaga nie tylko zebrania danych odnośnie do wartości "I" oraz dla "α" dla wszystkich przepuszczalnych dla powietrza elementów, ale również określenia zmienności różnic ciśnień. Mechanizm ich kształtowania przedstawiono schematycznie na rysunku 2. Składa się on z dwóch lub trzech sił w zależności od rodzaju zastosowanej wentylacji. Są to siły naturalne: wyporu termicznego i naporu wiatru oddziałujące zarówno na przegrody zewnętrzne, jak i kanały wentylacji grawitacyjnej (naturalnej). W przypadku zastosowania wentylacji mechanicznej istotna jest również jej moc (wydatki i spręże wentylatorów) oraz opory przepływu powietrza przez przewody wentylacyjne.

Oddziaływanie wiatru na budynek powoduje zmianę ciśnienia statycznego na jego przegrodach w stosunku do ciśnień panujących w warunkach niezaburzonego przepływu zewnętrznych strumieni powietrza. Zwiększenie ciśnienia zachodzi na przegrodach nawietrznych, czego efektem jest przepływ powietrza z zewnątrz do wnętrza obiektów (infiltracja powietrza). Na pozostałych przegrodach ciśnienia te mogą być ujemne (eksfiltracja powietrza). Wartość ciśnień związanych z wpływem wiatru wyraża równanie

$$p_w = 0.5\, c \varrho_z\, w^2, \quad \text{Pa} \tag{2}$$

gdzie:

ϱ_z - gęstość powietrza zewnętrznego, kg/m^3,
w - prędkość wiatru, m/s,
c - aerodynamiczny współczynnik lub współczynnik kształtu budynku.

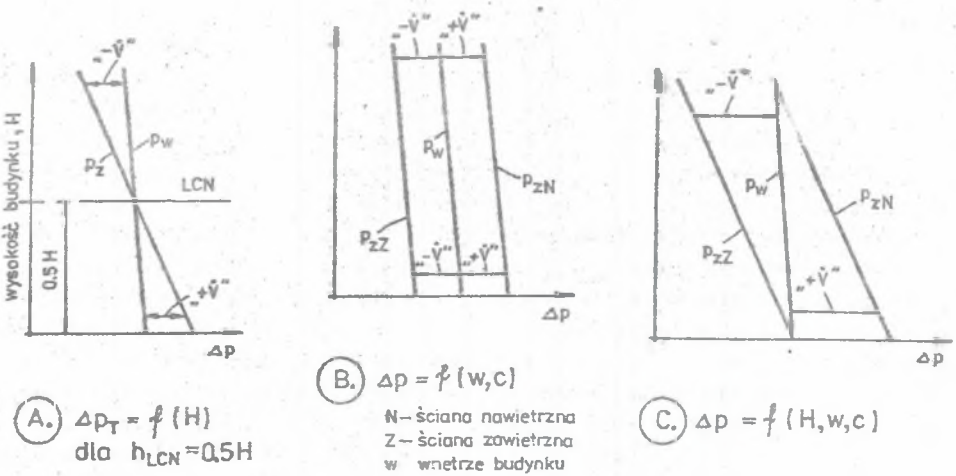
Zmiana prędkości wiatru nad terenem, zabudowa terenu, kierunek działania wiatru (kąt napływu), wysokość i kształt budynku określane są w czasie badań modeli obiektów w tunelach aerodynamicznych. Badania te umożliwiają określenie współczynników "c" dla każdej przegrody zewnętrznej (8, 9, 10, 11).

Różnice ciśnień wywołane wyporem termicznym uzależnione są od zróżnicowania temperatur powietrza wewnętrznego i zewnętrznego oraz szczelności przegród. Decydują one o położeniu tzw. linii ciśnień neutralnych (LCN), dzielącej budynek wzdłuż jego wysokości na dwie strefy. W dolnej - występuje nadciśnienie (infiltracja), a w górnej - podciśnienie w stosunku do ciśnień panujących wewnątrz obiektu (eksfiltracja). Wartość tej różnicy ciśnień określa zależność:

$$\Delta p_T = (\varrho_z - \varrho_w) g (h - h_{LCN}) = \varrho_w\, g (h - h_{LCN})(T_w - T_z), \quad \text{Pa} \tag{3}$$

w której

ϱ_w, ϱ_z - gęstość powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, kg/m^3
T_w, T_z - jw., lecz temperatury powietrza, K
h - położenie rozpatrywanego poziomu wzdłuż wysokości budynku, m
h_{LCN} - położenie linii ciśnień neutralnych, m.



Rys. 3. Rozkład ciśnień na przegrodach zewnętrznych budynków (schemat)
Fig. 3. Pressure distribution on the external walls of buildings (diagram)

Przykładowe rozkłady ciśnień przedstawia schematycznie rys. 3. Położenie linii "LCN" zmieniać się może w praktyce od 0,3-0,8 wysokości budynków i uzależnione jest także od rozplanowania pomieszczeń wewnętrznych oraz rodzaju i działania wentylacji (12, 13, 14).

Uwzględniając możliwość występowania na przegrodach budynków stref nad- i podciśnienia ilości powietrza ustalić można za pomocą zależności:

$$\dot{V} = I(|\Delta p|^{\alpha})\,\mathrm{sgn.}(\Delta p), \quad m^3/h \tag{4}$$

gdzie sgn. (Δp) oznacza znak "+" lub "-" w zależności od wartości nad- lub podciśnień (tzn. eksfiltracji lub infiltracji powietrza). Pełny obraz rozkładów różnic ciśnień uzyskać można uwzględniając rodzaj i konstrukcję zastosowanego układu wentylacji. Przepływ powietrza w kanałach wentylacji naturalnej podlega powyżej opisanym wpływom wyporu termicznego i naporu wiatru. Zastosowanie wentylacji mechanicznej zmienia zarówno rozkłady ciśnień, jak i przepływy powietrza w budynku (4, 7, 14, 15).

2. Ogólne zasady bilansowania powietrza w pomieszczeniach i budynkach

Bilansowanie powietrza przepływającego przez budynki sprowadza się do wykorzystania zależności (4) i określenia dróg przepływu powietrza. W konsekwencji otrzymuje się bilanse dla poszczególnych pomieszczeń lub dla całych brył obiektów:

$$\dot{V} = \sum_i \dot{V}_i = 0 \tag{5}$$

gdzie "i" jest ilością pomieszczeń położonych w obrębie rozpatrywanego budynku.

Realizacja bilansu (5) oznacza w każdym przypadku konieczność obliczenia ciśnień panujących w poszczególnych strefach, na jakie budynek został podzielony (np. pomieszczenie, mieszkania lub grupy mieszkań) lub ich wartości średnich - reprezentatywnych dla całej bryły budynku. Metody służące tego typu obliczeniom noszą nazwę, odpowiednio: szczegółowe i uproszczone. Stosowanie zależności (4) i bilansu (5) doprowadza do uzyskania układu równań nieliniowych, dla którego rozwiązania wykorzystuje się numeryczne metody iteracyjne. Iteracji podlegają wartości ciśnień w poszczególnych strefach (lub całym budynku), które zgodnie z metodą Newtona mogą być obliczane z zależności:

$$p_n^{(k+1)} = p_n^{(k)} - D_n \tag{6}$$

Problem sprowadza się do wyznaczenia w kolejnych krokach iteracyjnych (k) ciśnień $p_n^{(k+1)}$ znając ciśnienie $p_n^{(k)}$ z poprzednich przybliżeń tak, aby zamknąć bilans (5). Wartość D_n uzyskiwana jest z zależności macierzowej

$$[J] \cdot [D] = [B] \tag{7}$$

gdzie $[B]$ jest macierzą, której elementy mają postać:

$$B_n = \sum_i \dot{V}_i \, , \tag{8}$$

a $[J]$ jest jakobianem macierzy kwadratowej, której współczynniki na przekątnej głównej określane są z zależności:

$$J_{n,n} = \sum_i \frac{\partial \dot{V}_i}{\partial p_n} \tag{9}$$

a pozostałe współczynniki:

$$J_{n,m} = \sum_i \frac{\partial \dot{V}_i}{\partial p_m} \tag{10}$$

Po podstawieniu równania (1) do zależności (9) i (10) otrzymuje się zapis w postaci równań, np.:

$$\frac{\partial \dot{V}_i}{\partial p_n} = -\alpha_i \frac{\dot{V}_i}{\Delta p} \tag{11}$$

Prostsza metoda obliczeń polega na wyznaczaniu w kolejnych przybliżeniach dla strefy "n" ciśnienia

$$p_n^{(k+1)} - p_n^{(k)} = dp_n \approx \frac{\partial p_n}{\partial \dot{V}_i} d\dot{V}_i \tag{12}$$

a po przekształceniu

$$\sum \dot{V}_i = (p_n^{(k+1)} + p_n^{(k)})\left(\frac{\partial p_n}{\partial \dot{V}_i}\right) \tag{13}$$

co w rezultacie pozwala na otrzymanie

$$p_n^{(k+1)} = p_n^{(k)} - \dot{V}_i / \sum \frac{\partial \dot{V}_i}{p_n} . \tag{14}$$

Metody szczegółowe realizowane na podstawie powyższych zależności polegają najczęściej na założeniu w najwyższym punkcie budynku, np. w klatce schodowej, ciśnienia, a następnie rozwiązanie nieliniowych równań z jedną zmienną opisującą wymianę powietrza w przyjętej strefie lub strefach. W przypadku niezamknięcia się bilansu zmienia się wartość przyjmowanego ciśnienia i powtarza obliczenia (2, 16, 17, 18, 19).

Uproszczone metody obliczeń polegają również na wykorzystaniu bilansu w postaci równania (5), przy czym zakłada się, że obiekt ma kształt dowolnego prostopadłościanu ograniczonego czterema pionowymi ścianami zewnętrznymi oraz stropami nad piwnisą i najwyższym piętrem mieszkalnym. Pomijanie wewnętrznego rozplanowania pomieszczeń wymaga stosowania szeregu założeń upraszczających, a także weryfikacji uzyskiwanych wyników (20, 21).

3. Przegląd stosowanych metod obliczeniowych

Wszystkie stosowane modele matematyczne oparte są na zależnościach (1) lub (4) i realizacji równania bilansowego (5) dla dowolnych warunków je określających. W zależności od założeń odnośnie do rozpływu powietrza w budynkach i opisu mechanizmów ich kształtowania modele te zaliczane są do jednej z powyżej opisanych grup. Istotnym kryterium ich podziału, oprócz szczegółowości opisu omawianych procesów, jest cel przeprowadzanych analiz.

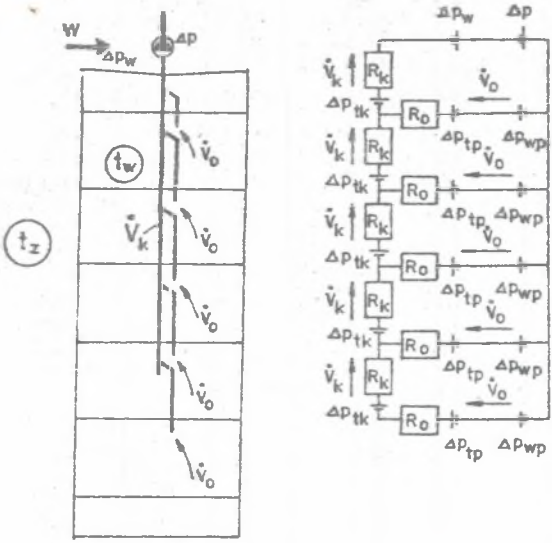
- W przypadku gdy celem analiz jest określenie dróg przepływu powietrza w obrębie budynku stanowiącego zbiór pomieszczeń, stosuje się szczegółowe metody obliczeń. Polegają one na dokładnym opisie matematycznym procesów przepływu powietrza przez poszczególne elementy (szczeliny w przegrodach,

oknach, drzwiach, kanały wentylacyjne itp.) oraz zebraniu szczegółowych informacji odnośnie do charakteru wpływu wewnętrznych i zewnętrznych czynników powodujących powstawanie określonych różnic ciśnień w dowolnych punktach przegród budowlanych. Metody te wykorzystywać należy również w przypadku, gdy opory przepływu powietrza przez wnętrze budynku są duże. Oznacza to, że wszędzie, gdzie pomijanie wewnętrznego rozplanowania pomieszczeń powodować może istotne zmiany ciśnienia wewnętrznego, stosowanie tych metod jest niezbędne.

Jeżeli celem analiz jest ocena intensywności wymiany powietrza w budynkach, zastosowanie mogą znaleźć uproszczone metody obliczeń. Uproszczenie to związane jest z pominięciem istnienia wewnętrznych przegród i obliczanie jednej wartości ciśnienia. Realizacja takiego celu wymaga opracowania danych odnośnie do zmian czynników zewnętrznych w postaci umożliwiającej ich bezpośrednie wykorzystanie (np. klasy i zabudowy terenu, temperatur zewnętrznych, kierunków i prędkości wiatru itp.). Jednocześnie niezbędne jest wypracowanie zasad obliczania procesów przenikania powietrza przez całe przegrody zewnętrzne. Metody te często stosowane są również w odniesieniu do budynków składających się z określonej ilości pomieszczeń, przy czym podstawę do oceny ciśnień są współczynniki korekcyjne ustalone przez porównanie z wynikami obliczeń wykonywanymi za pomocą metod szczegółowych lub pomiarów wykonywanych w istniejących obiektach. Metoda uproszczonych obliczeń znajduje szczególnie zastosowanie w przypadkach, gdy uzasadnione jest traktowanie budynku jako "jednostki energetycznej", np. przy analizach dostawy ciepła do obiektów z zewnętrznych sieci ciepłowniczych [32].

Zasada stosowania szczegółowych metod obliczeniowych opiera się na podziale każdego z budynków na strefy o zróżnicowanych ciśnieniach. Strefami tymi mogą być poszczególne pomieszczenia, mieszkania lub ich grupy. Cały budynek przedstawiony jest w postaci siatki nieliniowych rezystancji, przy czym poszczególne opory odpowiadają miejscom przepływu powietrza w konstrukcji obiektu (rys. 4). Dotyczy to zarówno zewnętrznych i wewnętrznych przegród, jak i kanałów wentylacyjnych oraz komunikacyjnych i użytkowych przestrzeni występujących w obrębie budynku (klatki schodowe, korytarze, szyby wind, zsypy śmieci itp.). Modele takie opisują więc intensywności zarówno ruchu powietrza, jak i jego wymianę w sposób kompleksowy z wyszczególnieniem na poszczególne strefy. Ilość tych stref zależy od zastosowanej metody obliczeniowej i w większości przypadków nie przekracza 100 [2, 16, 17, 19, 22, 23, 24].

Przy wykorzystaniu uproszczonych metod oceny wymiany powietrza w obiektach zakłada się, że mają one kształt prostopadłościanu składającego się z czterech pionowych ścian zewnętrznych oraz stropów nad najwyższymi piętrami i piwnicami, w różnym stopniu przepuszczalnymi dla powietrza (rys. 5). Stosowanych jest kilkanaście modeli matematycznych, które różnią się przede wszystkim kompletnością i szczegółowością danych przyjętych do określa-



Rys. 4. Sieć wentylacyjna w budynku i jej analog elektryczny (przykład)

V_o, V_k - ilość powietrza odpowiednio w kanale zbiorczym i odgałęzieniach
R_o, R_K - opory przepływu powietrza przez odpowiednio odgałęzienia i kanał zbiorczy na wysokości pojedynczej kondygnacji
p - spręż centralnego wentylatora wywiewnego
p_w - różnica ciśnień nad wylotem z kanału wywiewnego wywołana działaniem wiatru
p_{tp}, p_{tK} - różnice ciśnień związane z wykresem termicznym, odpowiednio w pomieszczeniach i kanale zbiorczym
p_{wp} - różnice ciśnień w otworach wywiewnych związane z naporem wiatru

Fig. 4. Ventilating system in a building and its electric analogue (example)

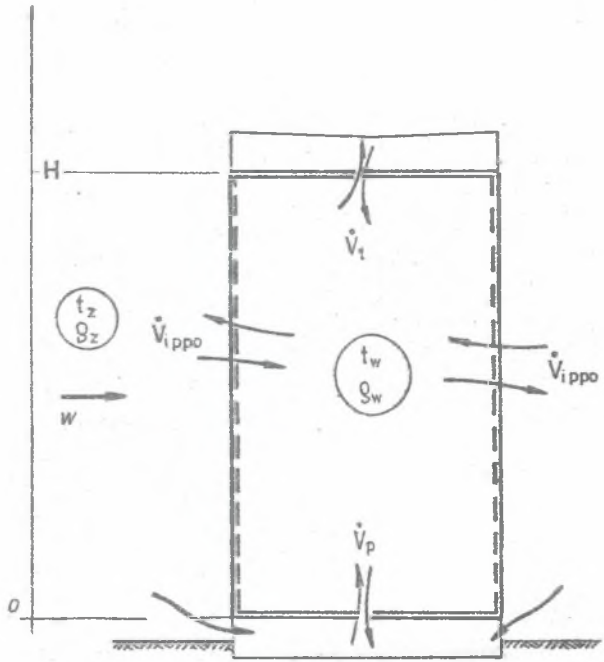
V_o, V_k - quantity of the air in a cumulative ventilating duct and lateral ducts, respectively
R_o, R_k - resistances of air flow through the lateral ducts and cumulative ducts respectively, at the height of a single storey
p - underpressure in a central exhaust fan
p_w - pressure difference over the exhaust duct outlet caused by the wind
p_{tp} - pressure differences related to temperature
p_{tK} - diagram in rooms and in a cumulative duct respectively
p_{wp} - pressure differences in exhaust openings related to the wind pressure

nia średniego zróżnicowania ciśnień w odniesieniu do poszczególnych przegród oraz do całości obiektu [4, 24, 25]. Z reguły zakłada się, że przepływy powietrza mogą być wywołane niezależnym oddziaływaniem wyporu termicznego, naporu wiatru i mocy zastosowanej wentylacji. Sumaryczne ilości powietrza wymienianego w budynkach uzyskiwane są z zależności

$$\dot{V} = \sqrt{\dot{V}_T^2 + \dot{V}_W^2 + \dot{V}_V^2}\,, \tag{15}$$

gdzie poszczególne indeksy oznaczają:

T - wypór termiczny,
W - napór wiatru,
V - moc wentylacji.



Rys. 5. Schemat obiektu przystosowanego do uproszczonych obliczeń wymiany powietrza (opis w tekście)

Fig. 5. Diagram of the building adapted to simplified calculations of air flows (description in the text)

Część ze stosowanych metod umożliwia określenie ilości wymienianego powietrza przy jednoczesnym oddziaływaniu powyższych czynników [27, 29, 36]. Istotnym elementem większości z nich jest ustalanie położenia linii LCN lub przyjmowanie poziomu odniesienia wykonywanych obliczeń na gruncie lub na wysokości dachu rozpatrywanego budynku [2, 25]. W omawianych metodach wielkości wykładników "α" (patrz zależność (1)) są jednakowe dla wszystkich elementów przepuszczalnych dla powietrza oraz szczeliny w przegrodach są równomiernie rozłożone wzdłuż nich.

Zarówno szczegółowe, jak i uproszczone metody obliczeń przepływów powietrza mogą być stosowane w odniesieniu do konkretnych typów budynków. Przenoszenie uzyskanych wyników badań na obiekty o innej konstrukcji lub innym podziale wewnętrznym na pomieszczenia jest jednym z powodów błędnej

interpretacji uzyskiwanych danych obliczeniowych. Porównanie zalet i wad obu omawianych metod przedstawia tabela 1. Jak widać, główną wadę szczegółowych metod obliczeń jest zebranie dużej ilości danych opisujących przepływy powietrza w obrębie obiektów i wynikającą stąd konieczność zastosowania komputerów o dużej pojemności. Do ogólnych ocen wystarcza w zupełności stosowanie uproszczonych modeli matematycznych. Problemem w tym zakresie jest jedynie znalezienie korelacji pomiędzy stosowanymi metodami obliczeń.

4. Opis zastosowanych metod obliczeniowych

Na podstawie wcześniej przedstawionych danych opracowano własne metody obliczeniowe umożliwiające zarówno szczegółową analizę przepływów powietrza, jak i oceny ogólnej wymiany powietrza w budynkach. Opracowane modele przeznaczone są zatem do wykonywania obliczeń rozkładów ciśnień na przegrodach jak i ilości powietrza przepływającego przez pomieszczenia oraz budynki. Obliczeń tych dokonuje się przy zmiennej temperaturze zewnętrznej, kierunku i prędkości wiatru z uwzględnieniem jego zmiany na różnych wysokościach nad terenem oraz warunków wewnętrznych określonych zmienną temperaturą w przestrzeniach zlokalizowanych w obrębie budynków.

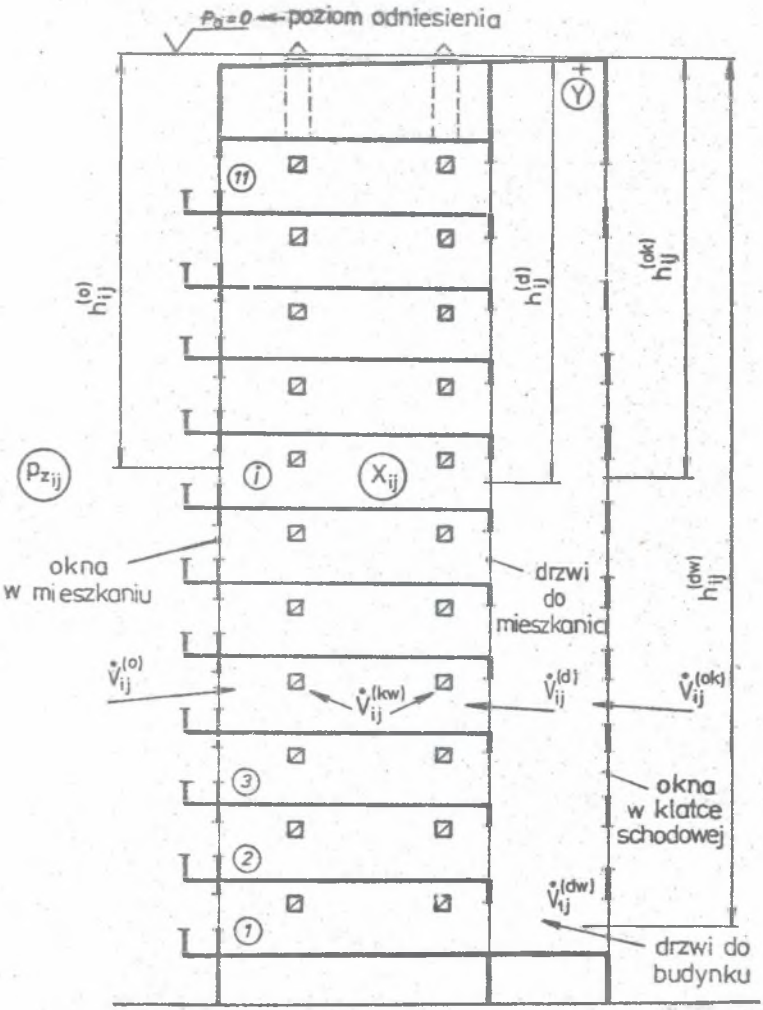
Poniżej zestawiono szczegółowe dane odnośnie do zasad przeprowadzanych obliczeń i założeń przyjętych do ich realizacji.

4.1. Szczegółowy model przepływów powietrza

Przepuszczalne dla powietrza elementy budowlane oraz kanały wentylacyjne tworzą dla każdego z budynków przestrzenną sieć powietrzną. Stosując zasadę bilansowania wydatków powietrza i warunków decydujących o intensywności ich przepływów budynek przedstawiony schematycznie na rys. 6 można opisać układem równań nieliniowych w postaci:

$$\left.\begin{aligned}
&\sum_{i,j=1}^{i,j}\Big[I_{i,j}^{(o)}(Pz_{i,j}-X_{i,j})^{\alpha_{i,j}}+I_{i,j}^{(d)}(Y-X_{ij})^{\alpha_{i,j}}+\\
&+I_{i,j}^{(kw)}(X_{i,j}-\Delta p^{(w)})^{0.5}\Big]=0\\
&I_{i,j}^{(dw)}(pz_{i,j}-Y)^{\alpha_{i,j}}+\sum_{i,j=1}^{i,j}\Big[I_{i,j}^{(ok)}(pz_{i,j}-Y)^{\alpha_{i,j}}+\\
&+I_{i,j}^{(d)}(Y-X_{i,j})^{\alpha_{i,j}}\Big]=0
\end{aligned}\right\}\qquad(16)$$

$\Delta p^{(w)}$ – różnica ciśnień związana z oddziaływaniem wiatru na wyloty powietrza z kanałów wywiewnych (poziom dachu – patrz rys. 4)



Rys. 6. Schemat obiektu przystosowanego do szczegółowych obliczań przepływów powietrza (opis w tekście)

Fig. 6. Diagram of the building adapted to detailed calculations of air flows (description in the text)

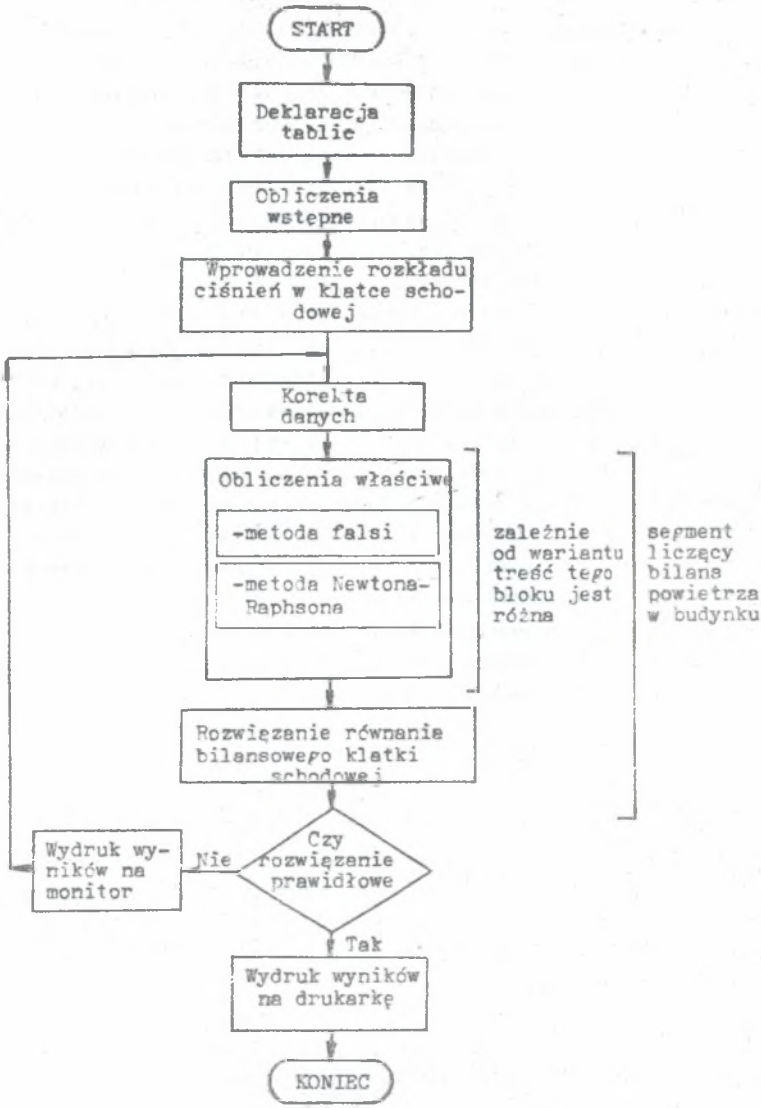
Zależność górna określa bilanse ilości powietrza w poszczególnych mieszkaniach (i - ilość kondygnacji, j - ilość mieszkań na piętrze), a dolna - w obrębie klatki schodowej łączącej te mieszkania.

Poszczególne indeksy oznaczają okna w mieszkaniach (o), okna w klatce schodowej (ok), drzwi wejściowe do mieszkań (d), drzwi wejściowe do budynku (dw) oraz kanały wentylacyjne (kw). W tym przypadku obiekt opisany jest

Tabela 1

Zakresy stosowania poszczególnych metod obliczeniowych

Metoda obliczeń	Pole zastosowań	Zalety	Wady
1. Szczegółowe modele matematyczne	- do określenia wymiany powietrza w całych kubaturach budynków i poszczególnych pomieszczeniach - do oceny przepływów powietrza pomieszczeniami lub strefami budynków - do analizy jakości powietrza wewnętrznego (mikroklimat) - do obliczeń potrzeb cieplnych	- symulacja ruchów powietrza w obrębie budynków - możliwość określenia zasad stosowania określonych rodzajów instalacji wentylacyjnych i grzewczych oraz sposobu ich działania	- konieczność szczegółowego opisu mechanizmów ruchu powietrza w kanałach wentylacyjnych - znaczne nakłady na szczegółowe obliczanie ruchów powietrza przez wszystkie elementy dla niego przepuszczalne
2. Uproszczone modele matematyczne	- do określenia wymiany powietrza w całych kubaturach budynków - do obliczeń potrzeb cieplnych - do porównania wyników pomiarów infiltracji powietrza w budynkach istniejących za pomocą technik podciśnieniowych	- proste obliczanie ruchów powietrza za pomocą małych komputerów - możliwość ogólnego określenia zasad doboru i działania stosowanych instalacji wentylacyjnych i grzewczych	- brak możliwości oceny wewnętrznych przepływów powietrza



Rys. 7. Schemat blokowy programu obliczeniowego "INFILTRACJA" (metoda szczegółowa)

Fig. 7. Block diagram of "INFILTRACJA" analytical program (multi-cell (detailed) method)

układem (k + 1) - nieliniowych równań o (k + 1) - niewiadomych, którymi są ciśnienie w poszczególnych mieszkaniach (x_{ij}) oraz ciśnienie w najwyższym punkcie klatki schodowej (Y). Dla układu równań (16) opracowano algorytm obliczeń wykorzystujący numeracyjne metody iteracyjne, a mianowicie "metodę falsi" (sprawdzającą się w przypadku gdy nie ma żadnych informacji i obliczanej wartości) oraz szybszą "metodę Newtona-Raphsona" (w przypadku gdy znane jest już przybliżenie szukanej wartości). Przyjęcie takiego systemu obliczeń jest podstawą opracowania programu realizowanego za pomocą maszyny cyfrowej. Na rys. 7 przedstawiono schemat programu obliczeń o nazwie "INFILTRACJA" wykonywanego na maszynie cyfrowej "Wang". Program ten składa się z 5 podprogramów, przy czym pierwszy z nich dotyczy obliczeń wstępnych odnośnie do rozkładów ciśnień zewnętrznych oraz danych wprowadzanych do obliczeń ($J_{i,j}$, α_{ij}). 4 następne odpowiadają wariantom przyjętych obliczeń w zakresie zastosowanej wentylacji, a ostatni sprawdza bilanse powietrza w klatce schodowej. Opracowany system obliczeń umożliwia wprowadzenie danych wejściowych w trybie konwersacyjnym, co pozwala radykalnie zwiększyć szybkość i dokładność uzyskiwanych wyników. Po wprowadzeniu wszystkich danych lub wykonaniu obliczeń istnieje możliwość przeprowadzenia korekty, począwszy od danych początkowych, które są sukcesywnie wyświetlane na monitorze. Opracowana procedura obliczeń posiada również zabezpieczenie przed wprowadzaniem wartości z dużymi odchyleniami od spodziewanego lub założonego zakresu ich zmian, a także przed przypadkowym lub nieprzemyślanym przyciśnięciem klawiszy.

Dokładność odwzorowywanych procesów przepływu powietrza zależy od dokładności przyjętych warunków brzegowych układu równań (16). Warunki te określają wartości sił wymuszających ruch powietrza (wypór termiczny, napór wiatru, moc wentylacji), warunki terenowe, w jakich zlokalizowany jest rozpatrywany budynek (konfiguracja i zabudowa terenu decydująca o wielkościach aerodynamicznych współczynników kształtu - c) oraz charakterystyki aerodynamiczne elementów przepuszczalnych dla powietrza (zależność (1)). Charakterystyki przedstawiono w postaci równań

$$\dot{V} = a \sum l \, (|\Delta p|)^{\alpha} \operatorname{sgn}(\Delta p) \, , \tag{17}$$

gdzie a jest tzw. współczynnikiem przenikania powietrza (w $m^3/m\ h\ (daPa)$), a $\sum l$ - długością szczelin (liczoną wzdłuż otwieranych części okien lub drzwi). Wartości współczynnika "a" oraz długości szczelin "$\sum l$" są więc danymi wstępnymi wprowadzanymi do obliczeń.

W celu określenia ciśnień zewnętrznych stosuje się zależność w postaci

$$p_{z_{i,j}} = \varrho_z g h_i + c \; 0{,}5 \; w_x^2 \, \varrho_z \, , \tag{18}$$

gdzie h_i jest pionową odległością rozpatrywanego punktu na przegrodzie zewnętrznej, a w_x jest wartością prędkości wiatru zmienną wzdłuż wysokości budynku. Odległości "h_i" wynikają z przyjętego na poziomie dachu budynku układu odniesienia wykonywanych obliczeń. Zmiana prędkości wiatru (w_x) wynika z faktu, że większość danych uzyskiwanych na stacjach meteorologicznych odniesiona jest do wysokości 10 m nad poziomem gruntu i terenu płaskiego. Przeprowadzanie obliczeń w odniesieniu do innych warunków wymaga więc korekty danych (2, 7, 11).
Ciśnienie wewnętrzne opisano równaniem

$$p_{w_{i,j}} = \varrho_w g h_i + X_{i,j} , \tag{19}$$

przy czym obliczeniom podlegają jedynie wartości $X_{i,j}$. Przy określaniu wielkości współczynników kształtu "c" oraz charakterystyk aerodynamicznych przewodów wentylacyjnych wykorzystuje się dużą ilość materiałów źródłowych i danych doświadczalnych [9, 26, 27, 38, 39]. W obliczeniach przyjmuje się następujący schemat postępowania:

- Założenie pierwszego przybliżenia odnośnie do rozkładu ciśnień w klatce schodowej (Y_1).
- Rozwiązanie równań bilansowych dla poszczególnych mieszkań (po wstawieniu wartości Y_1).
- Sprawdzenie poprawności przyjętego rozkładu ciśnień przez obliczenie bilansu klatki schodowej ($\sum V_{i,j} = 0$).
- W przypadku niezamknięcia się bilansu - $\sum V_{i,j} = 0$, zmiana rozkładu ciśnień w klatce schodowej (przyjęcie Y_2).
- Powtórzenie obliczeń dla wartości Y_2.

W przypadku gdy niezbędne jest uwzględnienie bilansów powietrza, np. w korytarzach, szybach wind itp., układ równań (16) zwiększa się o dodatkowe zależności (1) podobnie jak dane przyjmowane do obliczeń wstępnych. Wadą opracowanego programu obliczeniowego jest pomijanie przepuszczalności powietrznej stropów nad piwnicami, między piętrami i najwyższymi piętrami. Na rys. 8 przedstawiono przykładowy wydruk programu w postaci danych wejściowych oraz rozkładu ciśnień i ilości powietrza dla wybranego wariantu obliczeń przeprowadzanych w 11-kondygnacyjnym budynku mieszkalnym, przy założeniu że na każdym piętrze zlokalizowano po 2 mieszkania.

W dyspozycji autora opracowania znajdują się również programy umożliwiające obliczanie przepływów powietrza przy założeniu zmiennych wielkości wykładników "$\alpha_{i,j}$" zarówno dla szczelin w przegrodach jak i kanałów wentylacyjnych, obliczeniowego ustalania położenia LCN wzdłuż wysokości obiektów, różnicowania rozkładu szczelin na przegrodach itp. Zasady realizacji tych programów są podobne jak powyżej podano; różnią się one jedynie ilością stosowanych podprogramów obliczeniowych.

OBLICZANIE ROZKŁADÓW CIŚNIEŃ I PRZEPŁYWÓW POWIETRZA W BUDYNKU
****

DANE WEJŚCIOWE
****

1	RODZAJ WENTYLACJI ZASTOSOWANEJ W BUDYNKU:				
	1 = WENTYL.GRAWIT.BEZ NAWIEWU MECHAN.				
	2 = WENTYL.GRAWIT.Z NAWIEWEM MECHAN.				
	3 = WENTYL.MECHAN.BEZ NAWIEWU MECHAN.				
	4 = WENTYL.MECHAN.Z NAWIEWEM MECHAN.				
	WARTOŚĆ WSKAŹNIKA	/	LICZBA	/ =	1.00
2	USYTUOWANIE DRZWI ZEWNĘTRZNYCH:				
	0 = STRONA A-B				
	1 = STRONA C-D				
	WARTOŚĆ WSKAŹNIKA	/	LICZBA	/ =	0.00
3	ILOŚĆ KONDYGNACJI	/	LICZBA	/ =	11.00
4	WYSOKOŚĆ KONDYGNACJI	/	M	/ =	2.50
5	PRĘDKOŚĆ WIATRU	/	M/S	/ =	20.00
6	TEMP.POWIETRZA ZEWN.	/	C	/ =	20.00
7	TEMP.POWIETRZA WEWN.	/	C	/ =	20.00
8	TEMP.POWIETRZA KLATKI SCHOD.	/	C	/ =	15.00
	DŁUGOŚĆ SZCZELIN:				
9	OKNA MIESZKANIA-STR.A-B	/	M	/ =	20.00
10	OKNA MIESZKANIA-STR.C-D	/	M	/ =	13.50
11	OKNA MIESZKANIA-STR.B-C=A-D	/	M	/ =	0.00
12	DRZWI NA KLATKĘ SCHOD.	/	M	/ =	6.00
13	OKNA KL.SCHOD.-STR.A-B	/	M	/ =	5.00
14	OKNA KL.SCHOD.-STR.C-D	/	M	/ =	5.00
15	DRZWI ZEWNĘTRZNE DO BUD.	/	M	/ =	8.00
16	WSP.INFILTRACJI OKIEN	/M^3/M*H*PA^2/3/		=	5.00
17	WSP.INFILTRACJI OKIEN KL.SCHOD.	/M^3/M*H*PA^2/3/		=	0.50
18	WSP.INFILTRACJI DRZWI	/M^3/M*H*PA^2/3/		=	0.00
19	WSP.INFILTRACJI DRZWI ZEWN.	/M^3/M*H*PA^2/3/		=	0.00
20	SPRĘŻ WENTYLATORA WYWIEWNEGO	/	PA	/ =	167.00
21	SPRĘŻ WENTYLATORA NAWIEWNEGO	/	PA	/ =	192.05
22	OPORY ZAWORU WYWIEWNEGO	/	PA	/ =	137.00
23	OPORY ZAWORU NAWIEWNEGO	/	PA	/ =	150.70
24	WSP.AERODYNAMICZNY-C1	/	LICZBA	/ =	0.65
25	WSP.AERODYNAMICZNY-C2	/	LICZBA	/ =	0.65
26	WSP.AERODYNAMICZNY-C3	/	LICZBA	/ =	0.65
27	WSP.AERODYNAMICZNY-C4	/	LICZBA	/ =	-0.55
28	WSP.AERODYNAMICZNY-C5	/	LICZBA	/ =	-0.40
29	WSP.AERODYNAMICZNY-C6	/	LICZBA	/ =	-0.40
30	WSP.AERODYNAMICZNY-C7	/	LICZBA	/ =	-0.40
31	WSP.AERODYNAMICZNY-C8	/	LICZBA	/ =	-0.55
32	WSP.AERODYNAMICZNY-DACH	/	LICZBA	/ =	-0.40
33	KĄT NAPŁYWU WIATRU NA BUDYNEK	/	STOPNIE	/ =	90.00

NR.KOND.	WSP.WENT.GRAWIT. /KOL.1/	WSP.WENT.MECH. /KOL.2/
1	43.20	10.50
2	22.45	10.50
3	20.47	10.50
4	16.43	10.50
5	16.77	10.50
6	21.59	10.50
7	19.50	10.50
8	19.40	10.50
9	21.70	10.50
10	40.95	10.50
11	52.63	10.50

Rys. 8. Wyniki obliczeń przepływów powietrza (przykład)

Fig. 8. Results of the air flows calculations (example)

WENTYLACJA GRAWITACYJNA BEZ NAWIEWU MECHANICZNEGO

ROZKLAD CISNIEN [PA]

KOND.	DLA MIESZKANIA I NA SCIANACH ZEWNETRZNYCH AB	CD	AD	WEWNETRZNE	DLA MIESZKANIA II NA SCIANACH ZEWNETRZNYCH AB	CD	BC	WEWNETRZNE	DLA KLATKI SCHODOWEJ ZEWNETRZNE AB	CD	WEWNETRZNE
1	3.668	-2.257	-3.103	-1.218	3.668	-2.257	-3.103	-1.218	3.668	-2.257	1.200
2	8.833	-5.436	-7.474	1.706	8.833	-5.436	-7.474	1.706	8.833	-5.436	1.150
3	13.292	-8.180	-11.247	3.451	13.292	-8.180	-11.247	3.451	13.292	-8.180	1.100
4	17.398	-10.706	-14.721	5.402	17.398	-10.706	-14.721	5.402	17.398	-10.706	1.000
5	21.273	-13.091	-18.000	6.819	21.273	-13.091	-18.000	6.819	21.273	-13.091	0.850
6	24.977	-15.370	-21.134	7.571	24.977	-15.370	-21.134	7.571	24.977	-15.370	0.800
7	28.549	-17.568	-24.156	9.188	28.549	-17.568	-24.156	9.188	28.549	-17.568	0.700
8	32.011	-19.699	-27.087	10.505	32.011	-19.699	-27.087	10.505	32.011	-19.699	0.650
9	35.383	-21.774	-29.939	11.413	35.383	-21.774	-29.939	11.413	35.383	-21.774	0.600
10	38.676	-23.800	-32.725	9.585	38.676	-23.800	-32.725	9.585	38.676	-23.800	0.500
11	41.900	-25.784	-35.453	8.852	41.900	-25.784	-35.453	8.852	41.900	-25.784	0.400

ILOSCI POWIETRZA INFILTRUJACEGO [M3/H]

KOND.	DO MIESZKANIA I PO STRONIE AB	CD	AD	Z KLATKI SCHODOWEJ	ODPLYW KANALAMI	DO MIESZKANIA II PO STRONIE AB	CD	BC	Z KLATKI SCHODOWEJ	ODPLYW KANALAMI	DO KLATKI PRZEZ OKNA PO STRONIE AB	CD
1	289.50	-69.22	0.00	0.00	220.31	289.50	-69.22	0.00	0.00	220.31	-5.29	-10.88
2	372.76	-252.00	0.00	0.00	120.76	372.76	-252.00	0.00	0.00	120.76	4.82	-12.91
3	462.74	-349.36	0.00	0.00	113.38	462.74	-349.36	0.00	0.00	113.38	9.80	-14.49
4	528.40	-434.55	0.00	0.00	93.85	528.40	-434.55	0.00	0.00	93.85	13.51	-15.81
5	598.67	-500.82	0.00	0.00	97.85	598.67	-500.82	0.00	0.00	97.85	16.65	-16.95
6	676.07	-550.71	0.00	0.00	127.36	676.07	-550.71	0.00	0.00	127.36	19.35	-18.05
7	728.17	-610.50	0.00	0.00	117.67	728.17	-610.50	0.00	0.00	117.67	21.84	-19.04
8	781.31	-662.14	0.00	0.00	119.16	781.31	-662.14	0.00	0.00	119.16	24.10	-19.99
9	840.17	-705.28	0.00	0.00	134.89	840.17	-705.28	0.00	0.00	134.89	26.21	-20.89
10	956.56	-708.09	0.00	0.00	248.46	956.56	-708.09	0.00	0.00	248.46	28.23	-21.71
11	1041.89	-725.76	0.00	0.00	316.13	1041.89	-725.76	0.00	0.00	316.13	30.15	-22.50

ILOSC POWIETRZA INFILTRUJACEGO DO KLATKI SCHODOWEJ PRZEZ DRZWI WEJSCIOWE VDZ = 0

BILANS BUDYNKU = 3.851714974

Rys. 8. Wyniki obliczeń przepływów powietrza przykład)

Fig. 8. Results of the air flows calculations (example)

4.2. Uproszczona metoda analizy wymiany powietrza

Opracowany model uproszczonej wymiany powietrza zakłada, że przepuszczalne dla niego są wszystkie pionowe i poziome przegrody zewnętrzne, a sumaryczną ilość powietrza wymienianego w budynku obliczyć można za pomocą równania (rys. 5):

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^{4} \dot{V}_{ippo} + \dot{V}_p + \dot{V}_t \ . \tag{20}$$

gdzie poszczególne indeksy oznaczają, ppo - pionowe przegrody wraz z oszkleniem, p - stropy nad piwnicami, a t - stropy nad najwyższymi piętrami. Do opisu każdego z elementów równania (20) stosuje się zależność (4), przy czym zakłada się, że całkowitą ilość powietrza wyraża równanie

$$\sum \dot{V} = a_m A_z (\Delta p_m)^{\alpha_m} \ , \tag{21}$$

gdzie a_m jest średnim współczynnikiem przenikania powietrza odniesionym do sumarycznej powierzchni przegród zewnętrznych (A_z) wyrażonym w m^3/m^2 h (daPa). W sposób podobny określa się wartości średnich różnic ciśnień pomiędzy ciśnieniem zewnętrznym i wewnętrznym.

$$\Delta p_m = \sum_{i=1}^{6} \Delta \bar{p}_i \ (A_i/A_z) \ . \tag{22}$$

przy czym wartości $\Delta \bar{p}_i$ są różnicami ciśnień na każdej z sześciu przegród zewnętrznych o powierzchniach A_i. Przy wyrażeniu poszczególnych elementów równania (20) za pomocą zależności (17) i przekształceniach wartości średnich współczynników przenikania powietrza mogą być zapisane w postaci równania

$$a_m = \sum_{i=1}^{6} \bar{a}_i \left(\frac{A_i}{A_z}\right) \left(\left|\frac{\Delta \bar{p}_i}{\Delta p_m}\right|\right)^{\alpha} \mathrm{sgn}\delta(\Delta p) \tag{23}$$

Do realizacji powyższego równania niezbędne jest wstępne określenie współczynników przenikania powietrza odniesionych do całkowitej powierzchni każdej z 6 przegród zewnętrznych ($\bar{a}_i$), przyjęcie średniej wielkości wykładnika potęgowego α_m oraz przede wszystkim określenie różnic ciśnień kształtujących się na poszczególnych przegrodach zewnętrznych ($\Delta \bar{p}_i$).

Współczynniki przenikania powietrza dla każdej z 6 przegród zewnętrznych są średnimi ważonymi wartości tych współczynników dla określonych rodzajów elementów budowlanych przepuszczalnych dla powietrza oraz udziału powierzchni tych elementów w całkowitej powierzchni rozważanej przegrody

$$\bar{a}_i = \sum_{j=1} a_j \left(\frac{A_j}{A_i}\right) , \tag{24}$$

gdzie j oznacza ilość uwzględnianych elementów. Przykładowo dla ścian pionowych z oknami elementami przepuszczalnymi dla powietrza są zarówno okna, jak i powierzchnie pełnych ścian (j = 2).

Ponieważ brak jest informacji "a priori" odnośnie do wielkości wykładnika potęgowego "α", możliwe są dwie drogi ich przyjmowania

(I) Obliczenia wykonywać można przy alternatywnym założeniu wielkości "α_m" z zakresu $\langle 0,5;\ 1,0 \rangle$.
Wynikiem tak przeprowadzanych obliczeń jest określenie zakresu zmian ilości powietrza wymienianego w budynku

$$\sum \dot{V}\Big|_{\alpha_m=0,5} < \sum \dot{V} < \sum \dot{V}\Big|_{\alpha_m=1,0}$$

Efektem końcowym jest więc podanie intensywności wymiany powietrza w budynku w zależności od przewidywanej szczelności jego przegród na przepływy powietrza.

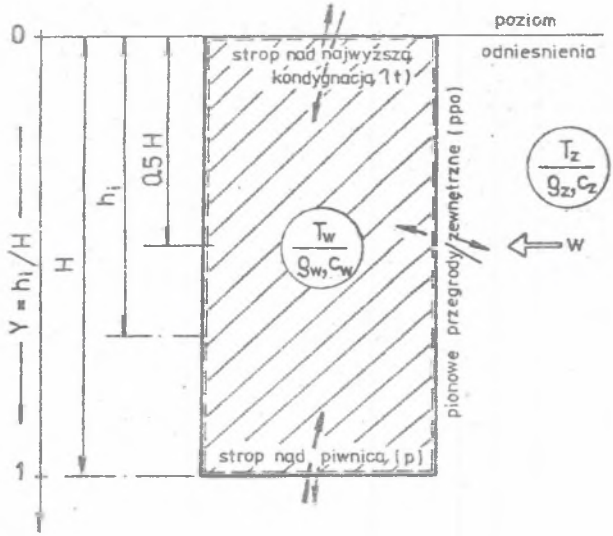
(II) Najczęściej wielkości wykładnika "α_m" przyjmowane są z zakresu podanego w pierwszym rozdziale opracowania, a więc α_m = 0,65-0,70 (średnio 0,67). W wyniku otrzymuje się pojedynczą wartość określającą wymianę powietrza w budynku

$$\sum \dot{V} = \sum \dot{V}\Big|_{\alpha_m = 0,67}$$

Uzyskane dane obliczeniowe mogą następnie być weryfikowane drogą badań w obiekcie istniejącym, co pozwala na określenie błędów wynikających z przyjęcia wielkości tego wykładnika.

• Określenie różnic ciśnień kształtujących się na poszczególnych przegrodach zewnętrznych polega na przyjęciu modelu obiektu i opisu matematycznego sposobów oddziaływania poszczególnych czynników na procesy wymiany powietrza. Model obiektu przedstawiony na rys. 9 składa się z wewnętrznej kubatury ograniczonej 6 przegrodami zewnętrznymi, przy czym poziomem odniesienia jest poziom stropu nad najwyższym piętrem, na którym ciśnienie atmosferyczne wynosi "p_o". Ciśnienia wewnętrzne i zewnętrzne mogą być opisane za pomocą równań

$$\left.\begin{aligned} p_w &= p_o + Hg\varrho_w + 0,5\ C_w \varrho_z w^2 \\ p_z &= p_o + Hg\varrho_z + 0,5\ C_z \varrho_z w^2 \end{aligned}\right\} \tag{22}$$



Rys. 9. Model budynku stosowany przy obliczeniach wymiany powietrza za pomocą metody uproszczonej (opis w tekście)

Fig. 9. Building model used in calculations of air exchange by means of simplified (single-cell) method (description in the text)

przy czym istotną zmianę w stosunku do powyżej opisanych mechanizmów kształtujących ciśnienia jest wprowadzenie, oprócz aerodynamicznego współczynnika kształtu odniesionego do zewnętrznych rozpływów powietrza (C_z), również takiego współczynnika, lecz odniesionego do warunków wewnętrznych (C_w). Wiatr działając na budynek wpływa pośrednio na ciśnienia ustalające się w jego wnętrzu (poprzez szczeliny w przegrodach zewnętrznych). Fakt ten uwzględnić można jedynie przez określenie wielkości tego współczynnika w postaci

$$C_w = \frac{\Delta p_o}{0{,}5 \varrho_z g w_o^2} \quad . \tag{23}$$

gdzie Δp_o jest zmianą ciśnienia wewnętrznego wywołaną działaniem wiatru odniesioną do prędkości wiatru w strefie przepływów niezabudowanych na poziomie odniesienia (w_o). Współczynnik ten ma więc identyczny sens fizyczny jak współczynnik "C_z" odniesiony do warunków zewnętrznych [15, 20]. Wprowadzając względną wysokość budynku w postaci współczynnika $Y = h/H$, w którym h jest pionową odległością od poziomu odniesienia do dowolnego punktu na przegrodach zewnętrznych budynku (patrz rys. 9), różnica ciśnień po obu stronach przegród wynosi:

$$\Delta\bar{p}_i = 0{,}5\,\varrho_z\,W^2\left[(C_z - C_w) + 2\,\frac{\Delta T\,h_i\,g}{T_w\,W^2}\,Y\right] \tag{24}$$

Zastępując poszczególne wartości w nawiasie przez

(I) $\Delta C = C_z - C_w$ - różnica pomiędzy wielkościami współczynników kształtu odniesionych odpowiednio do warunków zewnętrznych i wewnętrznych

(II) oraz $\frac{\Delta T\,h\,g}{T_w\,W^2} = Ar$ - liczba Archimedesa określająca stosunek sił wyporu termicznego do naporu wiatru

równanie (24) przyjmuje postać:

$$\Delta\bar{p}_i = 0{,}5\,\varrho_z\,W^2\,(\Delta C + 2\,Ar_i\,Y) \tag{25}$$

Dla przedstawionego na rys. 9 schematu obiektu wartości średnich różnic ciśnień na poszczególnych przegrodach zewnętrznych mogą być obliczone z wystarczającą dokładnością przy założeniach

- dla pionowych przegród zewnętrznych

$$\Delta\bar{p}_{ppo} = \Delta\bar{p}_i\Big|_{\text{dla } Y=0{,}5} = 0{,}5\varrho_z W^2(\Delta C + Ar) \tag{26}$$

- dla stropu nad najwyższym piętrem

$$\Delta p_t = \Delta p_i\Big|_{\text{dla } Y=0} = 0{,}5\varrho_z\,W^2\,\Delta C \tag{27}$$

- dla stropu nad piwnicą

$$\Delta p_p = \Delta p_i\Big|_{\text{dla } Y=1} = 0{,}5\varrho_z\,W^2(\Delta C + 2\,Ar) \tag{28}$$

Zależności (26), (27), (28) umożliwiają więc realizację równania bilansowego (20), a w konsekwencji określenie intensywności wymiany powietrza w obiekcie.

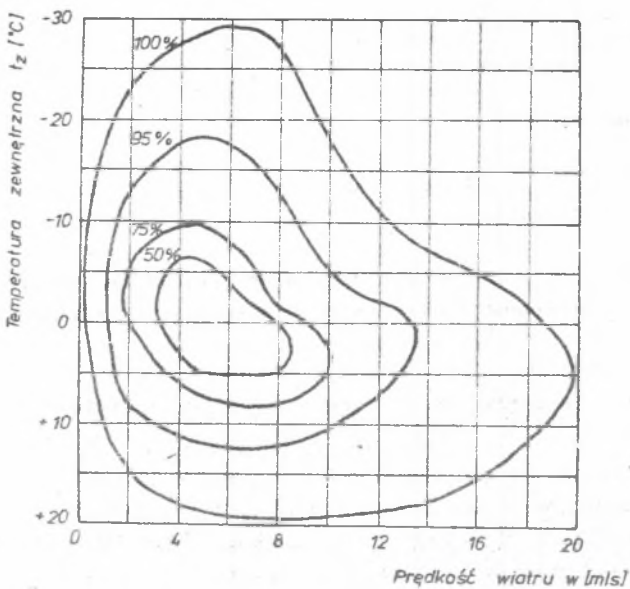
4.3. Założenia przyjęte do realizacji modeli i przykładowe wyniki obliczeń

W celu wykonania obliczeń konieczne jest zebranie dużej ilości informacji odnośnie do wartości zmiennych zależnych i niezależnych określających warunki wentylacyjne w budynkach. Zmiennymi tymi są w omawianym przypadku siły wymuszające przepływy powietrza (wypór termiczny i napór wiatru) uzależnione od danych meteorologicznych, wymagań wewnętrznych od-

nośnie do warunków cieplnych, warunków terenowych, w jakich zlokalizowany jest rozpatrywany budynek (konfiguracja i zabudowa terenu), dane geometryczne i kształt budynku oraz charakterystyki aerodynamiczne elementów przepuszczalnych dla powietrza (szczeliny w przegrodach, kanały powietrzne zastosowanego rodzaju wentylacji itp.). W zależności od wykorzystywanej metody analiz niezbędne jest uśrednianie lub szczegółowe określanie przyjmowanych wartości wszystkich powyższych zmiennych. W każdym przypadku przyjęcia konkretnych ich wartości wprowadzany jest więc opis matematyczny zachodzących w poszczególnych pomieszczeniach (metoda szczegółowa) lub budynkach (metoda uproszczona) zjawisk. Opis taki tworzy każdorazowo model matematyczny badanego obiektu.

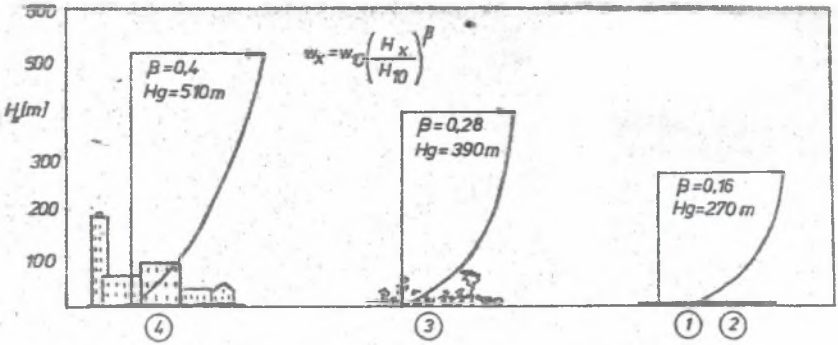
- Warunki cieplne w pomieszczeniach wewnętrznych. Z punktu widzenia celu wykonywanych obliczeń określenie wewnętrznych warunków cieplnych, jakie należy utrzymywać w obiektach mieszkalnych, sprowadzić można do podania wartości temperatury powietrza odpowiadającej przeznaczeniu budynków i pomieszczeń. Średnia wartość tej temperatury powinna wynosić +20°C. W trakcie intensywnej eksploatacji kuchni lub łazienek temperatura powietrza w kanałach wywiewnych może sięgać +40°C [28, 29].

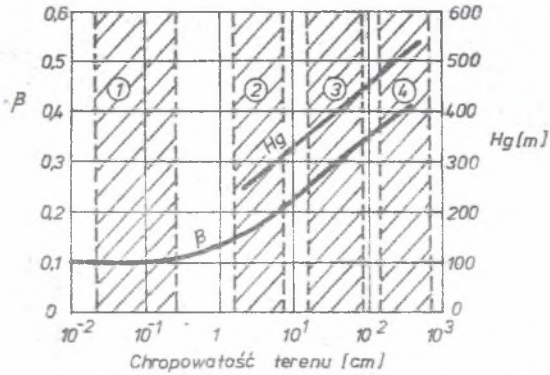
- Temperatury powietrza zewnętrznego i prędkości wiatru. Wartości obu czynników zależne są od klimatu danej miejscowości, a charakterystyczne ich zmiany dla terenu Polski przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Częstotliwość występowania temperatur zewnętrznych i prędkości wiatru

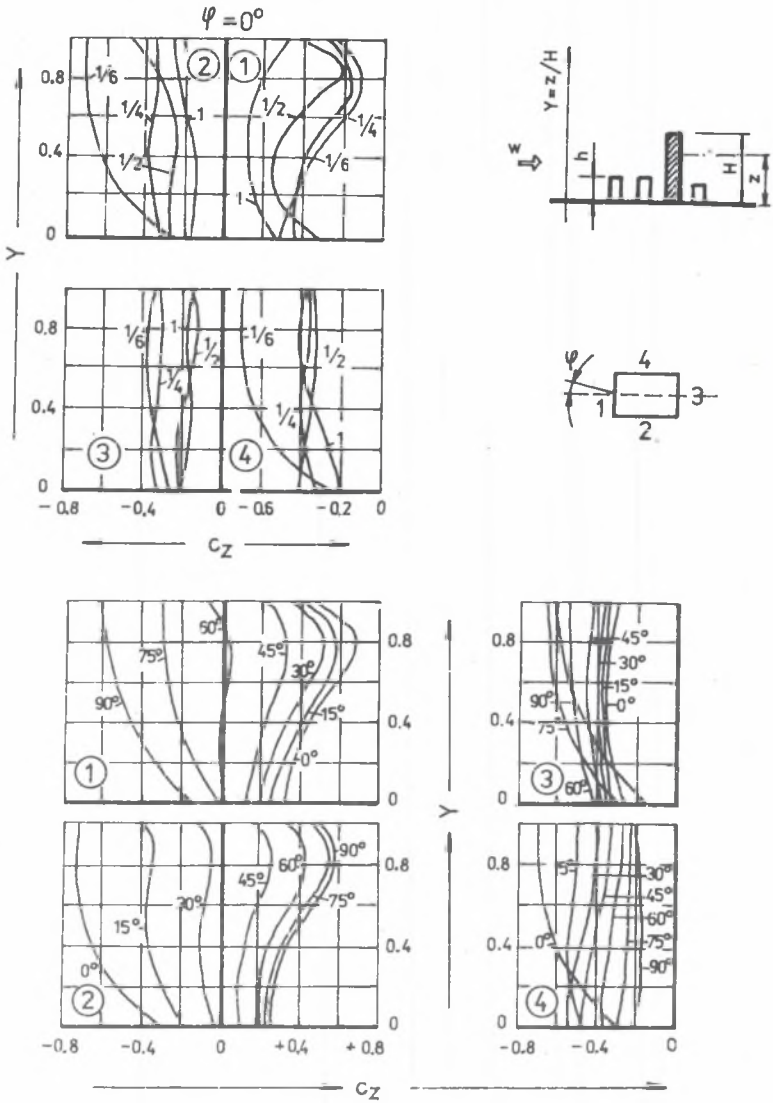
Fig. 10. Frequency of changes in external temperatures and wind velocities





Lp.	Teren	β	Hg [m]	Chropowatość terenu [m]
1	Otwarte morze	0,1 ÷ 0,15	240 ÷ 320	0,005 ÷ 0,05
2	Teren płaski	0,15 ÷ 0,25	320 ÷ 400	0,05 ÷ 0,5
3	Teren zadrzewiony	0,25 ÷ 0,35	400 ÷ 480	0,5 ÷ 1,5
4	Teren miejski	0,35 ÷ 0,45	480 ÷ 550	1,5 ÷ 3

Rys. 11. Zmiany prędkości wiatru na dowolnej wysokości nad poziomem terenu
Fig. 11. Wind velcity changes at arbitrary height above ground level



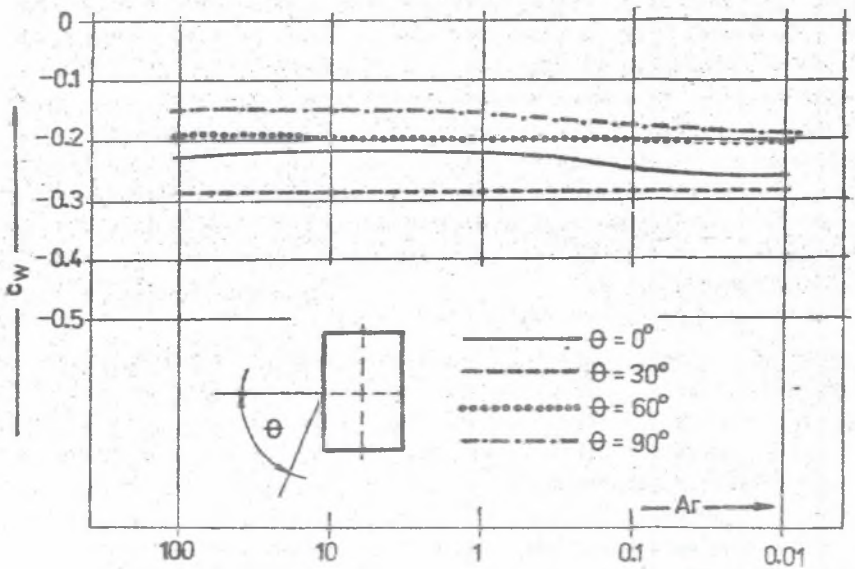
Rys. 12. Zmiany aerodynamicznych współczynników kształtu (C_z) dla obiektów zlokalizowanych w terenie miejskim (przykład)

Fig. 12. Changes in surface pressure coefficients (C_z) for the objects located in a town area (example)

Widoczne jest połączenie niskich temperatur z wiatrami o małych prędkościach. Maksymalne, średnie prędkości wiatru (około 10 m/s) występują przy temperaturach powietrza zewnętrznego w granicach od +5°C do +15°C. Dane te pozwalają na ograniczenie przyjmowanych do obliczeń kombinacji zmian obu czynników. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że podane na rys. 10 prędkości wiatru odpowiadają wartościom mierzonym na stacjach meteorologicznych, a więc na wysokości około 10 m nad poziomem terenu płaskiego. W przypadku gdy przeprowadzane są obliczenia przepływów powietrza w obiektach wyższych od 10 m i położonych w terenie np. zabudowanym, niezbędna jest korekta prędkości wiatru, która może być wykonana na podstawie danych przedstawionych na rys. 11 [2, 30].

• Konfiguracja i zabudowa terenu. Wpływ ukształtowania terenu na prędkość i kierunek wiatru uwidacznia się przyrostem prędkości wzdłuż wierzchołków wzniesień i ich równoległych zboczy oraz jej zmniejszeniem wzdłuż zboczy zawietrznych i w zagłębieniach terenowych [26, 31]. Istotny wpływ ma występowanie podwyższonego lub obniżonego ciśnienia statycznego na przegrodach obiektów ma ich kształt oraz kierunek działania wiatru. Dane takie uzyskiwane są podczas badań modeli budynków w tunelach aerodynamicznych, pozwalających na jednoczesne uwzględnienie rodzaju zabudowy terenu. Ilustracją tego może być rys. 12, za pomocą którego określić można wartości aerodynamicznych współczynników kształtu (C_z) budynku o określonym kształcie i położonym w terenie o zróżnicowanej zabudowie. Należy podkreślić, że podobne dane uzyskiwane przez wielu autorów (rozdział 1) są prezentowane w literaturze specjalistycznej w bogatym zakresie i uwzględnienie ich w obliczeniach przepływów powietrza wymaga jedynie zebrania i selekcji w zależności od celu przeprowadzanych analiz.
Utrudnione jest natomiast zdefiniowanie wielkości współczynnika C_w, ponieważ wymaga przeprowadzenia badań w obiektach istniejących. Niemniej i w tym zakresie istnieje wystarczająca ilość danych, których część zebrano na rys. 13 [20, 32]. Odpowiadają one zmienności różnic temperatur wewnętrznych i zewnętrznych w granicach 5-40 K oraz prędkości wiatru 0,5-10 m/s przy zróżnicowanym jego kierunku. Jak wynika z przedstawionych danych, wielkości tego współczynnika wahają się średnio w zakresie "-0,15"- -0,30", przy czym kierunek działania wiatru wpływa w minimalnym stopniu na jego zróżnicowanie. Decydujące zatem znaczenie mają zmiany współczynnika "C_z", a więc zewnętrzne warunki aerodynamiczne.

• Charakterystyki aerodynamiczne elementów przepuszczalnych dla powietrza. Dane w tym zakresie przedstawiono w rozdziale 1 opracowania odnośnie do szczelin w przegrodach zewnętrznych (patrz zależność (1) lub (4)). Problematyka ta jest eksponowana w części dotychczasowych prac autora [2, 4, 5, 7, 17], dlatego też zdecydowano się w niniejszym opracowaniu jedynie na ogólną jej charakterystykę (przedstawioną na rys. 1). Ilości powietrza przepływające przewodami wentylacyjnymi obliczane są na podstawie równania



Rys. 13. Zakres zmienności współczynników C_w w zależności od kierunku wiatru (wielkości liczby Archimedesa zaprezentowane na rysunku odpowiadają zmienności prędkości wiatru w zakresie 0,5-10 m/s oraz różnicy temperatur wewnętrznych i zewnętrznych w zakresie 5-40 K)

Fig. 13. Range of C_w coefficients wariation according to wind direction (the Archimedes numbers shown in the figure correspond with the wind velocities within the range of 0,5-10 m/s and the internal and external temperature differences from 5K to 40K)

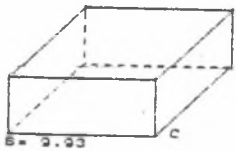
podobnego do zależności (1). W celu stwierdzenia, jaki wpływ na wielkość współczynnika "α" mają w tym przypadku średnice i długości przewodów oraz ilości przepływającego przez nie powietrza, opracowano program obliczeniowy realizowany za pomocą maszyny cyfrowej [2]. W wyniku analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że przyjęcie do obliczeń wielkości współczynnika α = 0,5 może spowodować błąd w określaniu ilości powietrza nieprzekraczający ± 5% wartości rzeczywistych, przy czym dotyczyć to będzie jedynie przepływu powietrza w ilościach mniejszych od 20 m^3/h, odpowiadających, przy stosowanych średnicach i długościach przewodów ruchom powietrza w zakresie przepływów w strefie przejściowej. Przy zastosowaniu wentylacji mechanicznej mamy do czynienia z burzliwym ruchem powietrza, a więc kwadratową zależnością strat ciśnienia (Δp) od ilości powietrza (α = 0,5). Przyjęcie charakterystyki aerodynamicznej przewodów wentylacyjnych wiąże się zatem z założeniem wielkości wykładnika α = 0,5 oraz obliczeniem wartości współczynnika "I" uzależnionego od rozwiązania konstrukcyjnego tych kanałów.

```
BILANS=  -35.20
    OBLICZANIE  ROZKŁADÓW  CIŚNIEŃ  I  PRZEPŁYWÓW  POWIETRZA
                        W  BUDYNKU

                    DANE  WEJŚCIOWE:
                    ----------------

  ILOŚĆ  KONDYGNACJI                          IK = 11       [ - ]
  PRĘDKOŚĆ  WIATRU                            W  =   .00    [M/S]
  WSP. RODZAJU  ZABUDOWY                      K  =  0.16    [ - ]
  TEMP. POWIETRZA  ZEWN.                      TZ =-20       [ C ]
  TEMP. POWIETRZA  WEWN.                      TWP=+20       [ C ]
  TEMP. POWIETRZA  KLATKI  SCHOD.             TW =+20       [ C ]
  DŁUGOŚĆ  SZCZELIN
       STRONA  NAWIETRZNA                     LN = 13.20    [ M ]
       STRONA  ZAWIETRZNA                     LZ = 18.10    [ M ]
       DRZWI  NA KL. SCHODOWA                 LD =  6.40    [ M ]
       OKNA KLATKI SCHOD-STR. NAW.            LON=  5.20    [ M ]
       OKNA KLATKI SCHOD-STR. ZAW.            LOZ=  5.20    [ M ]
       DRZWI  ZEWNĘTRZNE                      LDZ=  9.50    [ M ]
  WSP. INFILTRACJI  OKIEN                     A  =  2.50    [M4/KG*H]
  WSP. INFILTRACJI  OKIEN KLATKI SCHOD.       AO =   .50    [M4/KG*H]
  WSP. INFILTRACJI  DRZWI                     AD =   .50    [M4/KG*H]
  WSP. INFILTRACJI  DRZWI  ZEWN.              ADZ=  2.50    [M4/KG*H]
  SPRĘŻ WENTYLATORA                           HW =  5.04    [KG/M2]
  KĄT  NAPŁYWU WIATRU NA BUDYNEK              FI = 90       [STOPNIE]

                    WYNIKI  OBLICZEŃ:
                    -----------------

  BILANS =  +1.98 [M3/H]

                    CIŚNIENIA   [KG/M2]
  PX - CIŚNIENIE W POMIESZCZENIU
  PZN- CIŚNIENIE NA NAWIETRZNEJ ŚCIANIE BUDYNKU
  PZZ- CIŚNIENIE NA ZAWIETRZNEJ ŚCIANIE BUDYNKU
  PKI- CIŚNIENIE NA KLATCE SCHODOWEJ
  CIŚNIENIE W NAJWYŻSZYM PKCIE KLATKI SCHODOWEJ
                    PK= +1.00
  CIŚNIENIE W MIEJSCU WYLOTU KANAŁU WENTYLACYJNEGO
                    PWD=  +.00
  KOND          PX          PZN          PZZ          PKI

    1          -.64        +4.98        +4.98        +1.00
    2          -.55        +4.50        +4.50        +1.00
    3          -.67        +4.03        +4.03        +1.00
    4          -.82        +3.55        +3.55        +1.00
    5         -1.00        +3.08        +3.08        +1.00
    6         -1.21        +2.60        +2.60        +1.00
    7         -1.47        +2.13        +2.13        +1.00
    8         -1.79        +1.65        +1.65        +1.00
    9         -2.18        +1.18        +1.18        +1.00
   10         -2.64         +.70         +.70        +1.00
   11         -3.18         +.23         +.23        +1.00

                    PRZEPŁYWY   [M3/H]
  VON -ILOŚĆ POWIETRZA INFILTRUJĄCEGO PO STR. NAWIETRZNEJ
  VOZ -ILOŚĆ POWIETRZA INFILTRUJĄCEGO PO STR. ZAWIETRZNEJ
  VKL -ILOŚĆ POWIETRZA NAPŁYWAJĄCEGO DO MIESZKAŃ Z KL. SCHOD.
  VK  -ILOŚĆ POWIETRZA WYPŁYWAJĄCEGO KANAŁAMI WENTYLACYJNYMI
  VOKN -ILOŚĆ POW.INFILTR.DO KL.SCHOD.PRZEZ OKNA PO STR.NAW.
  VOKZ -ILOŚĆ POW.INFILTR.DO KL.SCHOD.PRZEZ OKNA PO STR.ZAW.

  KOND     VON         VOZ         VKL         VK          VOKN        VOKZ

  1      +84.36      +115.68      +3.92      +203.96      +5.60       +5.60
  2      +81.14      +111.27      +4.08      +196.49      +5.22       +5.22
  3      +77.96      +106.89      +4.26      +189.11      +4.81       +4.81
  4      +74.95      +102.77      +4.47      +182.18      +4.38       +4.38
  5      +72.06       +98.80      +4.70      +175.56      +3.90       +3.90
  6      +69.46       +95.24      +4.98      +169.67      +3.38       +3.38
  7      +67.25       +92.22      +5.29      +164.76      +2.78       +2.78
  8      +65.64       +90.00      +5.66      +161.30      +2.05       +2.05
  9      +64.73       +88.76      +6.09      +159.59      +1.00       +1.00
 10      +64.36       +88.53      +6.56      +159.66      -1.32       -1.32
 11      +65.21       +89.42      +7.08      +161.72      -2.25       -2.25

  ILOŚĆ POWIETRZA NAPŁYWAJĄCEGO PRZEZ DRZWI WEJŚCIOWE

  DO KLATKI SCHODOWEJ        VDZ= +51.15
```

Rys. 14a. Wyniki obliczeń wymiany powietrza (przykład)

Fig. 14a. Results of the air exchange calculations (example)

Teren miejski tw= 20

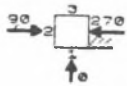


U= 400

B/C= 1

H= 4.08 m

D= 0.79



Kierunek wiatru 0

Wykladnik Pot. α = 0.67

Nr sciany	1	2	3	4	5	6
Ai/Az	0.13	0.13	0.13	0	0.31	0.31
Ao/Ai	0.35	0.35	0.35	0	0	0
a	1.67	1.67	1.67	.05	0.5	0.5
ci	0.7	-0.7	-0.3	-0.21	-0.35	-0.1

Roznica temperatur ΔT=50
Predkosc wiatru w=0.5

ΔP	4.82	4.7	4.74	0	-.01	9.5
r	1.01	0.99	1	0	-.02	1.59

ΔR = 0.88 ΔPm = 4.75
Ilosc Powietrza infiltracji vi=169.87
Ilosc wymian powietrza n=0.42

OBLICZANIE PRZEPLYWOW POWIETRZA
W BUDYNKU MIESZKALNYM

DANE WEJSCIOWE
==========

1=WENT GRAWIT
2=WENT MECH WYW
3=WENT MECH NAW
4=WENT MECH NAW-WYW

RODZAJ WENT RW=1
WYSOKOSC BUD H=30(m)
SZEROKOSC BUD S=12(m)
DLUGOSC BUD L=28(m)
PRZESZKLENIE K=0.21(-)
WSP INF OKIEN AO=17.9(m↑3/m↑2
*dPa↑.7)
WSP INF SCIAN AS=0.6(m↑3/m↑2*
dPa↑.7)
B=.16 DLA TERENU OTWARTEGO
B=.4 DLA TERENU ZABUDOWANEGO
WSP RODZ TERENU B=0.16(-)
WSP WENT GRAWIT AG=1728(m↑3/hed
Pa↑.7)
WSP WENT MECH AM=0(m↑3/hedPa↑
.7)
SPREZ WENT NAW PWN=0(dPa)
SPREZ WENT WYW PWW=0(dPa)
OPOR ZAWORU NAW PZN=0(dPa)
OPOR ZAWORU WYW PZW=0(dPa)
TEMP POW WEWN Ti=293(K)
TEMP POW ZEWN Te=253(K)
PREDKOSC WIATRU W=0(m/s)
KAT NAPL WIATRU A=90(ST)
WYKL POTEGOWY M=0.5(-)
CISN WEWN BUD P0=-3.008(dPa)

WYNIKI OBLICZEN
==========

ROZN CISN NA SCIANIE P(1)=0.203
ROZN CISN NA SCIANIE P(2)=0.203
ROZN CISN NA SCIANIE P(3)=0.203
ROZN CISN NA SCIANIE P(4)=0.203
ROZN CISN NA DACHU P(5)=0.200
ILOSC POW INFILTR VIN=3491
ILOSC POW EXFILTR VEX=0
ILOSC POW NAWIEWANEGO VN=0
ILOSC POW WYWIEWANEGO VW=4030
ILOSC WYMIAN POWIETRZA N=0.4

Rys. 14b, c. Wyniki obliczeń wymiany powietrza (przykład)
Fig. 14b, c. Results of the air exchange calculations (example)

Zebrane i odpowiednio zestawione dane w zakresie powyżej opisanych czynników tworzą każdorazowo warunki początkowe dla realizacji bilansu powietrznego pomieszczeń i budynków. Przykładem w tym zakresie są wyniki obliczeń wraz z zestawieniem danych wejściowych przedstawione na rys. 14. Stanowią one jednocześnie ilustrację w zakresie możliwości opracowanych metod obliczeniowych.

5. Podsumowanie

Na podstawie analizy stanu wiedzy w zakresie modelowania matematycznego procesów wymiany powietrza i jego przepływów w budynkach opracowano dwie podstawowe metody obliczeń. Dla obu metod przedstawiono sposób realizacji obliczeń i zestawiono dane, jakie należy zebrać w zależności od zastosowanej metody. Mając na względzie zarówno zróżnicowany wpływ na przepływy powietrza wielu czynników, jak i różne cele stawiane przed obliczeniami tego typu zaprezentowane metody umożliwiają:

- wykonanie dokładnej analizy ilości powietrza przepływającego przez poszczególne pomieszczenia wewnętrzne oraz kierunków ruchu tego powietrza (metoda szczegółowa)
- lub też przeprowadzenie obliczeń uproszczonych, ale mających duże znaczenie inżynierskie, przy czym pomija się w tym przypadku wewnętrzny podział obiektu, a końcowym efektem jest jedynie wymiana powietrza odniesiona do całości budynku (metoda uproszczona).

Zastosowanie w obu przypadkach maszyn cyfrowych sprawia, że dokładność uzyskiwanych danych uzależniona jest jedynie od przyjętego modelu fizycznego w zakresie oddziaływania różnych czynników na mechanizmy kształtowania się przepływu powietrza oraz dokładności danych stanowiących warunki początkowe (dane wejściowe) dla poprawnej realizacji opracowanych modeli cyfrowych. Do oceny tej poprawności za niezbędne uważać należy zarówno prowadzenie badań w obiektach istniejących w celu porównania i weryfikacji obu przedstawionych metod, a także ocenę możliwości określenia zależności korelacyjnych pomiędzy obliczeniami szczegółowymi i uproszczonymi.

LITERATURA

[1] Honma J.: "Ventilation of dwellings and its distrubances", KTH Stockholm. Tekniska Meddelanden, S-75, 1976.

[2] Nantka M.: "Wpływ czynników zewnętrznych na skuteczność wentylacji w budynkach mieszkalnych", Praca doktorska, Pol. Śl. 1979.

[3] Grimsrud D.T. and others.: "Infiltration - pressurization correlations", ASHRAE Transcation, part I, 1979.

[4] Nantka M.: "Theoretical and experimental study of heat flows due to the air infiltration and ventilation", Materiały konferencyjne 7th Congress HVAC, Praga, 1984.

[5] Nantka M.: "Przenikanie powietrza przez przegrody budowlane - Problem i konsekwencje", Materiały Konferencji nt. Wentylacja w budownictwie i przemyśle, PZITS, Kraków 1985.

[6] Lindskoung N.E.: "Byggnaders täthet: Ett energiproblem i skymundan", Teknisk Tidskrift. No 15, 1977.

[7] Nantka M.: "Wpływ dokładności charakterystyk aerodynamicznych szczelin na wiarygodność obliczeń wymiany powietrza w budynkach mieszkalnych", Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Nr 26, 1986.

[8] Davenport A.G., Dalgliesh W.A.: "A preliminary appraisal of wing loading concept of the 1970 Canadian National Building Code", Proc. 3rd Int. Conf. Wind effects on building and structures, Part 3, Tokyo 1971.

[9] Gandemer J.: "Champ de pression moyenne sur les constructions usuelles", Cahiers du Centre Scientifique te Technique du Batiment, No 1492 Paris 1978.

[10] Tieleman H.W. and al.: "A comparision wind tunel and fullscale wind pressure measurements on low-rise structures", 4th Coll. Indst. Aerodynamices, Aachen 1980.

[11] Cermak J.E.: "Aerodynamics of buildings", Ann. Rev. Fluid Mechanics, S 75, 1976.

[12] Grimsrud D.T., Sherman M.H.: "Infiltration - pressurization correlation: simplified physical modeling", ASHRAE Trans., part 2, 1980.

[13] Wilson A.G., Tamura G.T.: "Stect effect and buildings design" Canadian Building Digest, No 107, 1968.

[14] Howarth A.T., Burberry P.J.: "Ventilation and internal air movements for summer and winter conditions", 3rd Air Infiltration Centre Conference, paper 6, London, 1982.

[15] Roy B., Pion J.C.; "Ameliorer la ventilation dans les logements existants", Cahiers techniques du Batiment, No 35, 1981.

[16] Nantka M., Majerski S.: "A Numerical method for air change rate of building calculated", Proc. of 7th International Conference HVAC, Praga 1981.

[17] Nantka M.: "Ventilation and heat losses in buildings", 6th International Congres HVAC, Varna 1984.

[18] Conte S., De Boor C.: "Elementary numerical analysis an algotithmic approach", Mc Graw-Hill Report pp. 84-88, 1972.

[19] Walton G.N.: "A Computer algorithm for predicting infiltration and interroom airflows", ASHRAE Transc. No 3, part 1B, 1984.

[20] Nylund P.O.: "Infiltration and ventilation", Swedish Council for Building Research, D22, Stockholm 1980.

[21] Tamura G.T., Shaw C.Y.: "Studies on the ecterior wall air trightness and air infiltration of tall buildings", 1st AIC Conference, Berkshire, UK, 1980.

[22] Liddament M., Allen C.: "The validation and comparision of mathematical models of air infiltration", Technical Note AIC 11, Air Infiltration Centre, 1983.

[23] Kronvall J.: "Air flows in building components" 3rd AIC Conference, paper 9, London 1982.

[24] Buildings and Community Systems: Air Infiltration in buildings: Literature survey and proposed research agenda, International Energy Agence, United States Dep. of Energy Operating Agent, 1977.

[25] Nantka M.: "Air flow in dewelling houses from an energy point of view", Proc. of the World Congres HVAC CLIMA 2000, Kopenhaga 1985.

[26] Sachs P.: "Wind forces in engineerings", International series of monographs in civil enginnering, volume 3, Pergamon Presa, 1972.

[27] Potter N.J.: "Effect of fluctuating wind pressures on natural ventilation rates", ASHRAE Transc., No 3, part 2, 1979.

[28] Pietrzyk i inni: "Badania wpływu systemu wentylacyjnego na przepływy powietrza w pomieszczeniu kuchni", Mat. Konf. PZITS, Kraków 1979.

[29] Weier H.: "Die Wirkung der Luftungssystem von Wohnhausern, Lüft und Kältetechnik No 12, 1975.

[30] Atlas klimatyczny Polski, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 1981.

[31] Mac D. Angus J.: "Wind loading on buildings", Architectural Science Series, London 1975.

[32] Warren P.R.: "A Simple method for predicting infiltration rates in housing", Proc. of CHB W67 3rd Int. Sym. Dublin, Ireland, 1982.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИНФИЛТРАЦИИ ВОЗДУХА И ВОЗДУХООБМЕНА В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ

Р е з ю м е

Определение воздухообмена это один из основных проблемов для оценки расхода тепла и микроклимата в жилых зданиях, особенно для систем натуралной вентиляци. В статье представлены маткматические модели, которые отличаться между собой способом учитивания внутренных структур домов. Представлены тоже примеры резултатов вычислений полученных автором.

MATHEMATICAL ARCHETYPES (MODELS) OF NATURAL VENTILATION PROCESSES IN APARTMENT BUILDINGS

S u m m a r y

One of the most important problems for estimation of both energy consumption and indoor climate requirements in apartment buildings is the air exchange rate determination, especially if natural ventilation is applied. The most often used analytic methods of air exchange calculations have been presented in the paper. There are two groups of mathematical archetypes that differ from each other in the way of taking the inner structures of buildings into account.
The calculation results obtained by means of the models characteristic for both groups and worked out by the author have been presented too.