

Marian B. NANTKA

METODY POMIARU WYMIANY POWIETRZA W BUDYNKACH MIESZKALNYCH

Streszczenie. Infiltracja powietrza i zapotrzebowanie ciepła na celę wentylacji pomieszczeń stanowi poważną część sumarycznych strat ciepła budynków. Jednocześnie procesy te są istotne dla mikroklimatu, jaki należy utrzymywać w pomieszczeniach oraz jakości powietrza wewnętrznego. Dlatego też ustalenie wymagań i rzeczywistych ilości powietrza wentylacyjnego, wymienianego w budynkach jest jednym z ważniejszych obecnie zagadnień. Uzyskanie pewnych danych możliwe jest w wyniku przeprowadzenia obliczeń wymiany powietrza, wykorzystujących matematyczne modelowanie procesów przepływu powietrza. Jednak w celu sprawdzenia i weryfikacji takich modeli niezbędne jest przeprowadzenie pomiarów w budynkach istniejących. Wykonanie takich pomiarów jest utrudnione ze względu na jednoczesny wpływ szeregu czynników na budynki. W opracowaniu przedstawiono przegląd różnych metod pomiarowych do oceny infiltracji powietrza i jego wymiany w budynkach mieszkalnych. Porównano stanowiska pomiarowe, jakie są konieczne do przeprowadzenia badań oraz zsekcentowano wybór najdokładniejszej techniki badawczej.

Skomplikowany charakter procesów wymiany powietrza w obiektach mieszkalnych przy jednoczesnym coraz częściej podkreślanym ich wpływie zarówno na warunki cieplne kształtujące się wewnątrz budynków, jak i ilość ciepła w nich zużywanego powodują, że niezbędna staje się realna ocena tych procesów. Oceny takie możliwe są jedynie przy wykorzystaniu odpowiednio opracowanych metod pomiarowych umożliwiających badanie oddziaływania czynników pomijanych w obliczeniach wykonywanych za pomocą modeli cyfrowych obiektów. W krajowej literaturze technicznej brak jest danych odnośnie do stosowanych metod pomiarowych. Dane te zestawiono w niniejszym opracowaniu, omawiając jednocześnie celowość i kompletność ich stosowania.

1. Wprowadzenie

Procesy wymiany powietrza w budynkach są zjawiskiem złożonym, uzależnionym od wielu jednocześnie oddziałujących czynników. Czynniki te można zebrać w trzy grupy zagadnień, a mianowicie:

- klimat zewnętrzny, konfiguracja i zabudowa terenu,
- forma geometryczna budynku, ich konstrukcja i rozplanowanie pomieszczeń wewnętrznych,

- moc zastosowanego rodzaju wentylacji i rozwiązanie konstrukcyjne przewodów powietrznych.

Sieć powietrzna budynku mieszkalnego składa się więc ze wszystkich przepuszczalnych dla powietrza elementów (lub pomieszczeń), przez które następuje jego przepływ. Są to zarówno kanały wentylacyjne, poziome lub pionowe, szyby o charakterze użytkowym lub komunikacyjnym, przechodzące wzdłuż całego budynku, lub wzdłuż jego części oraz szczeliny w przegrodach zewnętrznych lub wewnętrznych. Zarówno ilość, jak i kierunki ruchu powietrza zależne są od stopnia wpływu wymienionych czynników. W wyniku tego oddziaływania może dochodzić do kształtowania się wewnątrz obiektów warunków odbiegających od wymaganych, a utrudniających zgodną z przeznaczeniem eksploatację pomieszczeń [1, 2, 3, 4].

Do oceny omawianych zjawisk stosuje się dużą ilość matematycznych modeli umożliwiających uzyskanie dowolnej ilości informacji zarówno odnoszących się do przepływów powietrza, jak i jego wymiany [5, 6, 7, 8]. Informacje te obciążone są jednak różnego rodzaju błędami wynikającymi ze stopnia szczegółowości odnośnie do opisu poszczególnych zjawisk, przyjmowanymi do obliczeń. Opisom takim podlegają siły decydujące o wymianie powietrza, wśród których wymienić należy wypór termiczny, napór wiatru oraz moc wentylacji. Jednym z istotnych elementów takiego opisu są nieuszczelnienia występujące w stolarnie budowlanej, a także w złączach płyt ściennych nowo realizowanych obiektów. Stosowane w tym zakresie uproszczenia polegają na nieuwzględnianiu jednoczesności oddziaływania poszczególnych czynników lub całkowitym ich pomijaniu. W tej sytuacji realna ocena przepływów i wymiany powietrza może być uzyskana jedynie w wyniku przeprowadzenia badań i pomiarów w budynkach istniejących i eksploatowanych. Są one nie tylko pomocne, a wręcz niezbędne do sprawdzenia poprawności obliczeń wykonywanych w tym zakresie, a także stają się niejednokrotnie podstawą do opracowania uproszczonych modeli eksperymentalnych o dużym znaczeniu inżynierskim [5, 9, 10, 11].

2. Czynniki decydujące o wymianie powietrza w budynkach

Pośród wymienionych powyżej czynników oddziałujących na intensywność ruchów powietrza najistotniejszymi są rodzaj i moc zastosowanej wentylacji. W tym zakresie rozróżnić należy systemy wentylacji naturalnej i mechanicznej. W przypadku bezkanałowej lub kanałowej (tzw. grawitacyjnej) wentylacji naturalnej intensywność przepływu powietrza zależy jedynie od chwilowych wartości sił wyporu termicznego i naporu wiatru. Wentylacje naturalne są więc systemami o zmiennej mocy na przestrzeni całorocznego okresu zmian klimatycznych. Wpływ podciśnieniowego działania kanałów wywiewnych na przepływy powietrza jest w tym przypadku niewielki,

a jednocześnie niezgodny z wymaganiami ochrony cieplnej budynków [12, 13]. Wymagania te spełnić mogą w różnym zakresie stosowane rozwiązania wentylacji mechanicznej. Są to zresztą jedyne systemy zalecanej dla obiektów mieszkalnych wentylacji ciągłej z możliwością okresowego zwiększania intensywności w miarę aktualnych potrzeb. Istotne znaczenie w tego typu systemach ma rozwiązanie układu przewodów wywiewnych lub nawiewnych i stosowane urządzenia do regulacji ruchu powietrza. Moc wentylacji mechanicznej określana jest zwykle przez spręż zastosowanych wentylatorów wywiewnych lub nawiewnych, a wskaźnik określający ich skuteczność, definiowany jako stosunek oporów przepływu powietrza przez kanały zbiorcze do podobnych oporów ustalonych dla odgałęzień wentylacyjnych najwyższych kondygnacji, nie może przekraczać wielkości 1,11. Oznacza to, że ilość powietrza wymienianego w poszczególnych pomieszczeniach w obrębie budynku będą wahały się w zakresie $\pm 11\%$ średnich ilości powietrza wentylacyjnego [14].

Następną grupę czynników, jaką należy w badaniach wymiany powietrza uwzględnić, są zewnętrzne warunki aerodynamiczne. Na powyższe pojęcie składają się elementy związane z oddziaływaniem wyporu termicznego i naporu wiatru. Określenie ich wymaga zebrania informacji odnośnie do zróżnicowania temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, konfiguracji i zabudowy terenu, kierunku i prędkości wiatru oraz cech geometrycznych budynków i ich orientacji w stosunku do kierunku napływu strumienia powietrza zewnętrznego. Dane te uzyskać można zarówno na podstawie ich pomiarów, jak i zestawienia wyników badań wykonywanych w stacjach meteorologicznych lub dodatkowych pomiarów przeprowadzanych na modelach obiektów w tunelach aerodynamicznych [11, 15, 16, 17]. W praktyce pomiarowej ustalenie tych danych sprowadza się najczęściej do badania różnic ciśnień na przegrodach budowlanych, będących sumą oddziaływań związanych z występowaniem wyporu termicznego (ΔP_t), naporu wiatru (ΔP_w) i działania wentylacji (ΔP_v).

Niezależnie od rodzaju działania wentylacji oraz zmienności zewnętrznych warunków aerodynamicznych jednym z ważnych czynników jest szczelność przegród budowlanych i podział wewnętrzny obiektów. Z punktu widzenia bilansu powietrznego pomieszczeń istotne jest określenie charakterystyk aerodynamicznych wszystkich elementów przepuszczalnych dla powietrza. Są to zarówno nieszczelności w zewnętrznej obudowie budynków, jak i w przegrodach wewnętrznych stanowiących mniej lub bardziej szczelne zapory w przepływach powietrza. Przez charakterystykę aerodynamiczną rozumieć należy zależność ilości powietrza przepływającego przez dany element budowlany od różnicy ciśnień panujących po obu stronach. Zależność tę przyjmuje najczęściej postać równania:

$$\dot{V} = k(\Delta p)^{\alpha} \quad (1)$$

$$\text{lub } \dot{V} = a \sum l (\Delta p)^{\alpha} \quad (2)$$

$$\text{1 } \dot{V} = a \sum A (\Delta p)^{\alpha}$$

gdzie:

- $K = a \sum l$ (lub $a \sum A$) jest jednostkową ilością powietrza przenikającego przez każdy element budowlany, m^3/h przy $\Delta p = 1 \text{ daPa}$,
- a - współczynnik przenikania powietrza, $m^3/mh (\text{daPa})^\alpha$ lub $m^3/m^2h (\text{daPa})^\alpha$,
- $l, \sum A$ - sumaryczna długość szczelin lub powierzchnia rozważanego elementu m, m^2 ,
- α - wykładnik potęgowy zależny od konstrukcji szczelin i rodzaju ruchu powietrza ($0,5 < \alpha < 1,0$).

Zależności (1) i (2) ustalane mogą być jedynie drogą pomiarową (wyznaczane są wartości a i α) i stanowią podstawowy zapis matematyczny za pomocą którego analizować można procesy wymiany powietrza zarówno w poszczególnych pomieszczeniach, jak i w całych obiektach [5, 8, 18, 19]. Zestawienie prac, jakie należy wykonać, zaprezentowano w tabeli 1. Przed przystąpieniem do pomiarów w budynku istniejącym należy przeprowadzić prace i analizy wstępne obejmujące zasady określania wpływu czynników związanych z otoczeniem obiektu (klimatem zewnętrznym) oraz jego wnętrzem i konstrukcją. W zależności od przyjętej metody badań wymiany powietrza powyższe dane są uwzględniane w różnym stopniu zarówno przy opracowaniu uzyskiwanych wyników pomiarów, jak i ich analizie porównawczej w odniesieniu do różnych obiektów zlokalizowanych w różnych warunkach. Dane te stanowią więc opis budynków, przy czym o możliwości przeprowadzenia porównań i oceny dokładności badań decyduje stopień szczegółowości tego typu danych [5, 9, 10, 18].

3. Metody pomiarowej oceny intensywności wymiany powietrza w budynkach

Do oceny intensywności wymiany powietrza w pomieszczeniach lub budynkach wykorzystywane są metody eksperymentalno-obliczeniowe oraz oparte na pomiarach.

Metody eksperymentalno-obliczeniowe polegają na przeprowadzaniu badań odnośnie do zróżnicowania ciśnień na przegrodach zewnętrznych i wewnętrznych, poprzedzonych szczegółowymi pomiarami charakterystyk aerodynamicznych wszystkich elementów budowlanych i kanałów wentylacyjnych. W efekcie uzyskuje się charakterystykę ciśnieniową pomieszczeń (lub budynków), co przy znajomości zależności opisujących przepływ powietrza przez nieszczelności w przegrodach (zależności (1) i (2)) i kanały wentylacyjne pozwala obliczyć ilości powietrza wymienianego w poszczególnych pomieszczeniach lub budynkach. Metoda ta jest pracochłonna, wymaga zastosowania dużej ilości aparatury pomiarowej, a uzyskane wyniki mają znaczenie jedynie jako materiał porównawczy. Związane jest to z faktem zmienności i przypadkowości wpływu poszczególnych czynników.

Tabela 1

Zestawienie prac, które należy wykonać przed przystąpieniem do pomiarów wymiany powietrza

Rodzaj prac badawczych	Otoczenie zewnętrzne	Wnętrze budynku	Konstrukcja obiektu
Informacje zestawiane przed przystąpieniem do badań	1. Dane meteorologiczne odnośnie do zmian klimatycznych (łącznie występowanie temp. zew. i prędkości wiatru, główne kierunki działania wiatru).	1. Rozplanowanie wewnętrzne obiektów (pomieszczenia, szyby pionowe i poziome itp.) oraz rodzaj zastosowanej wentylacji.	1. Rozwiązania elementów budowlanych przepuszczalnych dla powietrza. 2. Rozwiązanie konstrukcyjne układu przewodów wentylacyjnych.
Analizy i badania wstępne	2. Analiza wpływu lokalizacji rozpatrywanego obiektu w danym terenie (zebranie wyników badań modeli budynków w tunelach aerodynamicznych). 3. Oceny zróżnicowania danych klimatycznych w miejscu wykonywania pomiarów w stosunku do ich wartości uzyskiwanych w stacjach meteorologicznych.	2. Inwentaryzacja i badanie elementów przepuszczalnych dla powietrza w wewnętrznych przegrodach budowlanych. 3. Analiza działania wentylacji.	3. Inwentaryzacja i badania elementów przepuszczalnych dla powietrza w zewnętrznej powłoce budynku.
		4. Badania układów ciśnień na przegrodach wewnętrznych i zewnętrznych rozpatrywanych budynków oraz zróżnicowania tych ciśnień w poszczególnych pomieszczeniach zlokalizowanych w obrębie budynku.	
	4. Rejestracja zmian poszczególnych czynników klimatycznych.	5. Rejestracja zmian przepływów powietrza przez poszczególne pomieszczenia, przez kanały wentylacyjne lub przez całe obiekty w zależności od przyjętej metody pomiarowej.	

W celu określenia charakterystyk aerodynamicznych elementów przepuszczalnych dla powietrza wykorzystuje się metodę "małych testów podciśnieniowych" [6, 8, 18, 20, 21]. Znana i stosowana jest również metoda tzw. "dużych testów podciśnieniowych", polegająca na ustaleniu pełnych charakterystyk szczelności całych połączeń przegród zewnętrznych lub całych obiektów [22, 23, 24].

Metody pomiarowe polegają na zastosowaniu do badań wymiany powietrza różnych odmian tzw. "techniki gazowej". Polega ona na dawkowaniu małych ilości gazu wskaźnikowego do pomieszczeń lub całego budynku i rejestrowania zmian koncentracji tego gazu w czasie. W celu zachowania warunków umożliwiających porównanie uzyskanych wyników niezbędna jest jednoczesna rejestracja zmian parametrów klimatu zewnętrznego. Przeprowadzenie badań za pomocą omawianych metod wymaga doboru lub konstrukcji odpowiedniej aparatury pomiarowej oraz wyboru stosowanego gazu wskaźnikowego. Powinien być to gaz o gęstości podobnej do gęstości powietrza, niewystępujący w budynkach, trudnopalny, nietoksyczny, nie reagujący z innymi gazami i materiałami znajdującymi się w budynku itp. Jednocześnie zastosowana do pomiarów stężeń tego gazu aparatura powinna umożliwiać badanie minimalnych jego koncentracji [25, 26, 27, 28, 29].

Na przestrzeni ostatnich paru lat metody te są stale rozwijane i dopracowywane jako najdokładniejsze przy weryfikacji zarówno wyników badań uzyskiwanych metodami podciśnieniowymi, jak i weryfikacji szeregu modeli obliczeniowych stosowanych do oceny intensywności przepływów i wymiany powietrza [9, 25, 29].

Ze względu na małą przydatność eksperymentalno-obliczeniową metod badania wymiany powietrza oraz konieczność stosowania przy opracowaniu wyników uzyskanych z ich pomocą modeli matematycznych [5, 7, 29] poniżej opisano szczegółowo jedynie metody ciśnieniowe i gazowe.

3.1. Badanie wymiany powietrza za pomocą metod ciśnieniowych

Intensywność zarówno przepływów powietrza, jak i jego wymiany zależy nie tylko od rodzaju i konstrukcji zaprojektowanej przegrody, ale również od jakości montażu oraz warunków atmosferycznych, w jakich realizowano obiekty. Dlatego też miarodajne do oceny w tym zakresie mogą być jedynie pomiary wykonywane w budynkach istniejących, nie zaś na specjalnych stanowiskach laboratoryjnych. Powszechnie stosowaną metodą pomiarów jest więc badanie charakterystyk przegród lub ich elementów w obiektach istniejących za pomocą technik ciśnieniowych. Polegają one na wytworzeniu w obrębie przepuszczalnego dla powietrza elementu budowlanego, pomieszczenia lub budynku, podciśnienia lub nadciśnienia za pomocą wentylatorów lub poprzez wzmaganie działania istniejącego w budynku systemu wentylacji mechanicznej. W warunkach ustalonej ilości powietrza usuwanego lub nawiewanego przez wentylatory równe będą ilościom powietrza doprowadzanego przez nie lub przenikającego na zewnątrz.

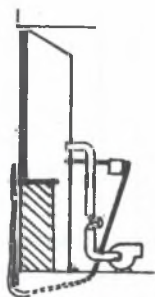
Zmieniając wydatek wentylatora uzyskuje się charakterystykę w postaci zależności (1), (2). Dysponując określoną ilością pomiarów w postaci odpowiadających sobie kombinacji par wartości V i ΔP możliwe jest uzyskanie danych odnośnie do charakterystycznych dla danego elementu lub przegrrody współczynników K i wykładników d (zgodnie z równaniem (1)). W zależności od zakresu wykonywanych badań w omawianym aspekcie stosuje się technikę podciśnieniową w "ograniczonej" lub "pełnej" skali.

(1) "Ograniczony" zakres w stosowaniu technik podciśnieniowych wynika z wielkości i podziału wewnętrznego budynków. Dla wielokondygnacyjnych budynków mieszkalnych o dużych wymiarach i dużej ilości mieszkań (lub pomieszczeń wewnętrznych) wykorzystanie technik ciśnieniowych w pełnej skali jest utrudnione. W tym przypadku pomiary przeprowadza się ograniczając je do poszczególnych elementów budowlanych (np.: okien, drzwi, szczelin w płytach itp.). Na rys. 1 przedstawiono schematycznie zasadę wykonania omawianych badań.

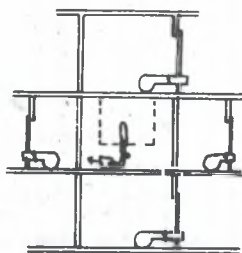
Wentylator połączony jest ze szczelną obudową przewodem wyposażonym w urządzenie do pomiaru ilości powietrza (kryza pomiarowa lub przepływowe urządzenia rejestrujące). Jednocześnie mierzona jest różnica ciśnień pomiędzy ciśnieniem panującym po jednej stronie badanego elementu i w obudowie (mikromanometr cieczowy lub elektryczny z rejestratorem). Zmiany ilości powietrza przepływającego przez badany element uzyskuje się przez regulację wydajności wentylatora za pomocą np. potencjometru. Dla poprawnego przeprowadzenia badań wystarczające jest zastosowanie wentylatorów o wydajności około 200 l/s i sprężu do 500 Pa. Wymiar przewodu łączącego obudowę z wentylatorem nie powinien przekraczać \varnothing 200 mm. W efekcie przeprowadzania tego typu pomiarów uzyskuje się odpowiadające sobie kombinacje par wydajności Δp i V składające się na charakterystykę aerodynamiczną każdego z badanych elementów.

(2) Przez wykorzystanie technik ciśnieniowych w "pełnym" zakresie do badania wymiany powietrza i oceny szczelności przegród rozumie się najczęściej przeprowadzanie pomiarów odniesionych do kompleksu przegród budowlanych otaczających pomieszczenia (lub mieszkania), a nawet całego budynku [24, 26, 30]. W zależności od skali przeprowadzanych pomiarów różnic można różne metody postępowania badawczego.

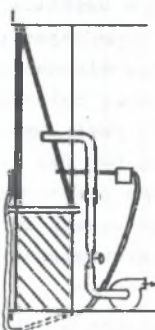
W przypadku gdy celem pomiarów jest ustalenie charakterystyki infiltracyjnej kompleksu przegród w pojedynczym pomieszczeniu lub mieszkaniu, w miejscu drzwi wejściowych do nich montuje się tzw. "drzwi zastępcze", których konstrukcję i oprzyrządowanie przedstawiono na rys. 2 [29, 31]. W pomiarach tego typu istotne jest uszczelnienie drzwi wzdłuż istniejącego otworu, a zasada polega na wytworzeniu w pomieszczeniach odpowiednich podciśnień (lub nadciśnień) za pomocą wentylatora osiowego o zmiennej wydajności. Jednocześnie mierzone są i rejestrowane różnice ciśnień i ilości powietrza przepływającego przez pomieszczenie. Badanie różnic ciśnień



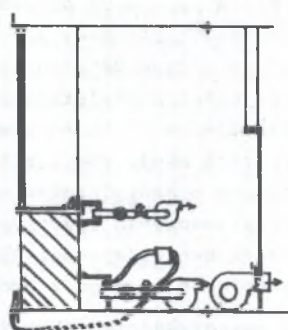
a) cała przegroda
zewnętrzna



b) przegrody wewnętrzne



c) okno

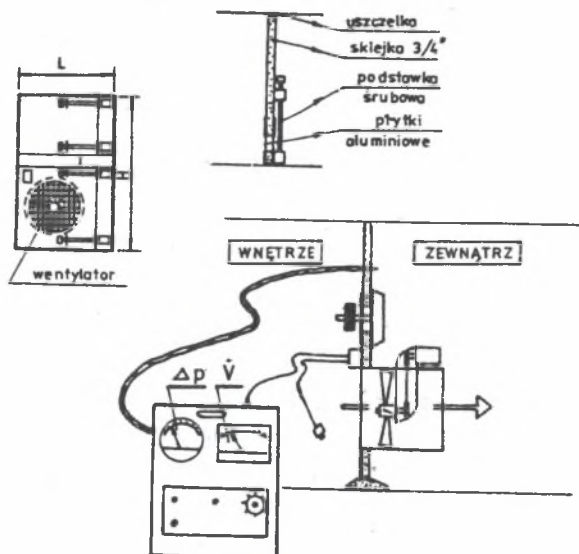


d) szczeliny w miejscu
połączenia elementów

Rys. 1. Zasada pomiaru szczelności elementów budowlanych na przepływ powietrza ("małe testy" ciśnieniowe)

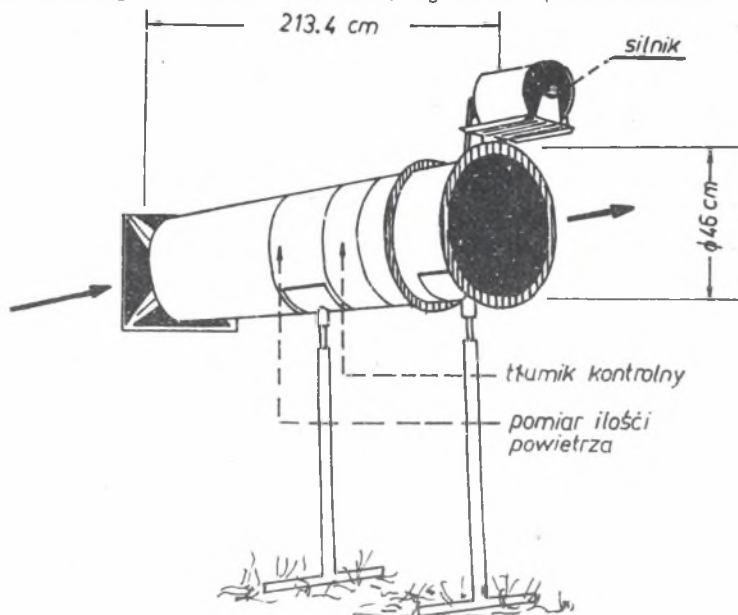
Fig. 1. Principle of measuring building elements tightness against air flow (small-scale pressurization tests)

obejmować może zarówno powierzchnię przegród zewnętrznych, jak i odnosić się jedynie do ciśnienia panującego w pomieszczeniu oraz przestrzeni korytarza lub klatki schodowej po wewnętrznej stronie drzwi zastępczych. W ostatnim okresie opracowano uproszczoną zasadę tego typu pomiarów, która polega na zastosowaniu przyrządu zwanego infiltrometrem. Pozwala ona na rejestrację mierzonych i odpowiadających sobie różnic ciśnień i ilości



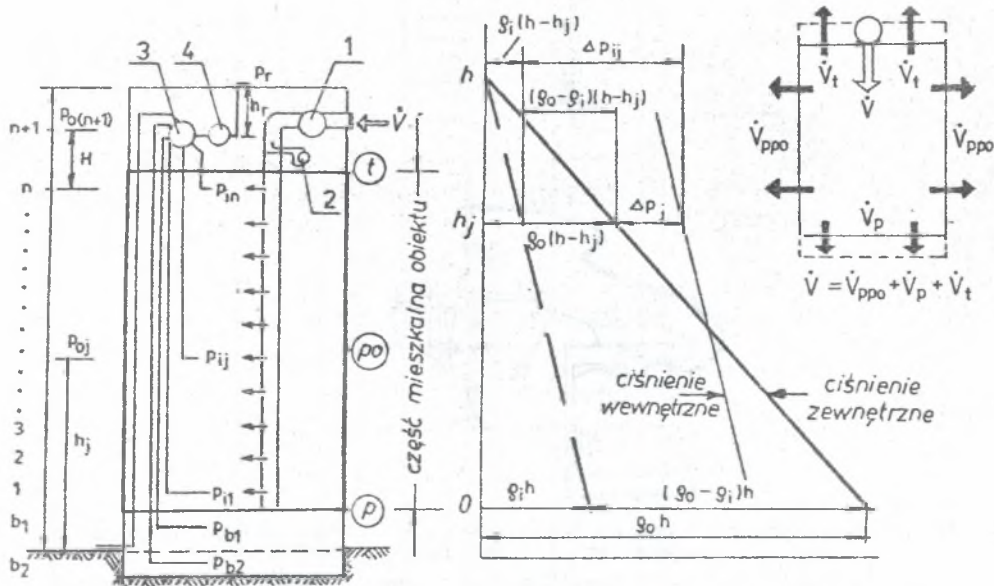
Rys. 2. Stanowisko pomiarowe do badania wymiany powietrza w pomieszczeniach lub mieszkaniach ("duże testy" ciśnieniowe)

Fig. 2. Measuring position (blower door and control panel) for testing air exchange in rooms or flats (large-scale pressurization tests)



Rys. 3. Specjalnie wykonany przewód do badania szczelności zewnętrznych przegród niewielkich obiektów (schemat)

Fig. 3. Pressure conduit made especially for testing air-tightness of external panels of small objects (diagram)



Rys. 4. Zasada pomiaru szczelności powłoki zewnętrznej wielokondygnacyjnego budynku mieszkalnego z wentylacją mechaniczną

1 - system przewodów nawiewnych, 2 - pomiar ilości powietrza nawiewanego do budynku (\dot{V}), 3 - przełącznik do pomiaru różnic ciśnienia, 4 - pomiar różnic ciśnienia

Fig. 4. Principle of measuring the air-tightness of the external coat of a multi-storey apartment building with mechanical ventilation

1 - system of supply conduits, 2 - quantity measurement of the air supplied into the building, 3 - change-over switch for pressure difference measurement, 4 - pressure difference measurement

powietrza przepływającego przez pomieszczenia. Przy założeniu znajomości zasad kształtowania się procesów infiltracji powietrza i ich matematycznego zapisu (zależność 1) oraz skojarzeniu go z komputerem możliwe jest uzyskanie pełnej charakterystyki aerodynamicznej pomieszczenia na podstawie pomiaru przy jednej różnicy ciśnień. Za najbardziej reprezentatywną dla odtworzenia charakterystyki z postaci zależności (1) ze względu zarówno na procesy infiltracji powietrza, jak i najczęściej występujące różnice ciśnień uważa się ich wartość równą 50 Pa [5, 6, 7, 11, 31].

Podobne pomiary przeprowadzać można w odniesieniu do całych budynków o niewielkich kubaturach (np. jednorodzinnych - parterowych). Ilustrację tego typu pomiarów przedstawia rys. 3. Za korzystne w tym przypadku uważa się stosowanie przewodu ssawnego o dużym przekroju, zamontowanego bądź w jednym z okien, bądź też w drzwiach wejściowych do budynku [22].

W budynkach o dużych wymiarach i dużej ilości pomieszczeń wewnętrznych możliwe jest zastosowanie badań za pomocą techniki ciśnieniowej, jeżeli tylko posiadają one wentylację mechaniczną. Polegają one na nawiewaniu

lub wywiewianiu dużych ilości powietrza z budynku przez zwiększenie mocy zastosowanych wentylatorów przy jednoczesnych pomiarach różnic ciśnień na przegrodach obiektu. Na rys. 4 przedstawiono zasadę tego typu badań wraz z uproszczonym modelem budynku będącym podstawą do opracowania charakterystyki aerodynamicznej całego obiektu.

Zastosowanie technik ciśnieniowych zarówno w ograniczonym zakresie, jak i w pełnym dostarcza danych z zakresu charakterystyki procesów przenikania powietrza. Określenie w tym przypadku intensywności wymiany powietrza w konkretnych warunkach meteorologicznych wymaga ich rejestracji wraz z odpowiadającymi im różnicami ciśnień występującymi na przegrodach.

3.2. Pomiary wymiany powietrza za pomocą technik gazowych

Wykorzystywanie do badań intensywności wymiany powietrza techniki gazowej jest najdokładniejszym i najpełniejszym sposobem pomiarów. Uzyskiwane dane zawierają informacje odnośnie do wpływu wszystkich czynników decydujących o tej intensywności, nie zawsze możliwych do uwzględnienia zarówno w badaniach wykonywanych za pomocą technik ciśnieniowych, jak i obliczeń teoretycznych.

Zasada pomiarów polega na rejestrowaniu zmian koncentracji gazu wskaźnikowego, która opisywana jest najczęściej zależnością wykładniczą:

$$C_{\tau} = C_0 \cdot e^{-n\tau} \quad (3)$$

gdzie C_0 i C_{τ} są stężeniami wprowadzanego gazu w czasie "0" (na początku pomiarów) i po określonym czasie " τ " (na końcu pomiarów), " n " zaś jest ilością wymiany powietrza w pomieszczeniu. Jeżeli stężenia C_0 i C są znane, to ilość wymian w danym pomieszczeniu wynosi:

$$n = \frac{1}{\tau} \ln \frac{C_0}{C_{\tau}} \quad (4)$$

Na podanej powyżej zasadzie oparte są trzy zasadnicze metody stosowanie techniki gazowej przy określaniu wymiany powietrza w pomieszczeniach.

Technika zaniku koncentracji gazu wskaźnikowego

Polega ona na pomiarach zmniejszających się stężeń gazu wskaźnikowego w określonym czasie. Fakt zmiany tych stężeń zapisywany jest w postaci równania:

$$\frac{dC_i}{d\tau} = (C_0 - C_i) \frac{V_1}{V_2} \quad (5)$$

gdzie C_0 oraz C_1 oznaczają odpowiednio koncentrację gazu wskaźnikowego w otoczeniu zewnętrznym i wewnętrznym pomieszczenia lub budynku, \dot{V}_1 jest ilością powietrza zewnętrznego przenikającą do obiektu, V_2 zaś jest wentylowaną kubaturą budynku. Stosunek \dot{V}_1/V_2 jest zatem intensywnością wymiany powietrza w badanej kubaturze pomieszczenia lub obiektu. Jeżeli stężenie gazu wskaźnikowego w otoczeniu zewnętrznym jest do pominięcia (sytuacja najczęstsza z racji wyboru gazu wskaźnikowego), równanie (5) przybiera postać zależności:

$$\frac{dc_1}{dt} = - C_1 \frac{\dot{V}_1}{V_2} \quad (6)$$

Przy założeniu idealnego wymieszania wtryskiwanego gazu z powietrzem wewnętrznym równanie (6) można przedstawić:

$$\log_n \left(\frac{C_1}{C_{10}} \right) = - \left(\frac{\dot{V}_1}{V_2} \right) \quad (7a)$$

lub

$$\frac{\dot{V}_1}{V_2} = - \frac{1}{t} \log_n (C_1/C_{10}). \quad (7b)$$

przy czym C_{10} jest początkowym stężeniem gazu wskaźnikowego. Intensywność wymiany powietrza wyznaczana za pomocą tej techniki odpowiada założeniu stałej w czasie pomiarów ilości powietrza przenikającego z zewnątrz do budynków, a także istnieje poważny problem wyznaczania efektywnej objętości pomieszczenia biorącej udział w wymianie powietrza. Omawiana technika pomiarów jest najczęściej stosowanym sposobem badań w budynkach istniejących i eksploatowanych [32, 33, 34, 35].

Ostatnio coraz częściej wykorzystywaną metodą badań jest technika stałej koncentracji. Przy tego typu pomiarach w pomieszczeniach lub budynkach stężenie gazu wskaźnikowego utrzymywane jest na stałym poziomie, przy użyciu układów regulacji automatycznej [33].

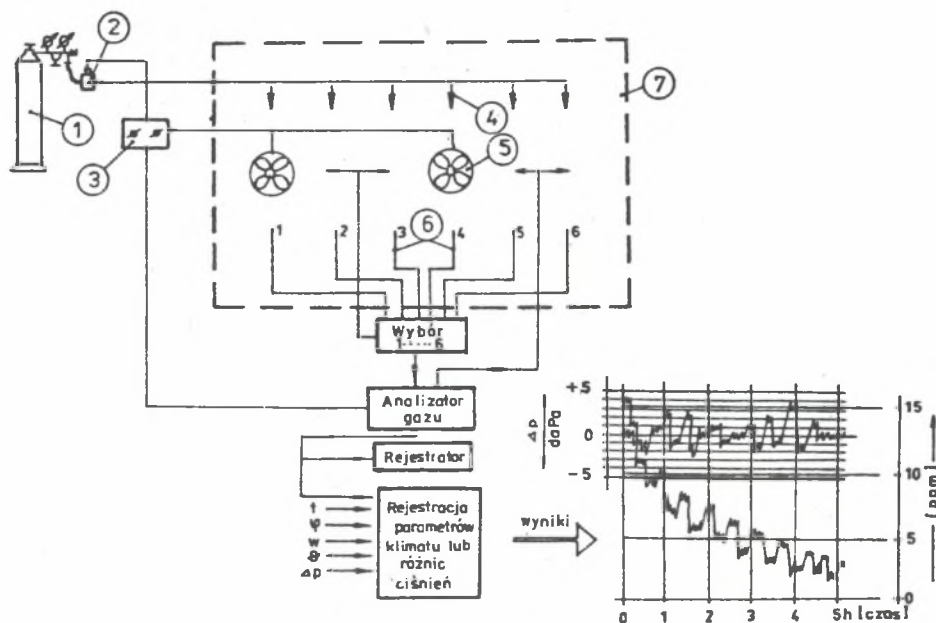
Łączna ilość dodatkowo dostarczanego gazu wskaźnikowego jest funkcją zmiennej w czasie ilości powietrza wymienianego z otoczeniem

$$G = c n, \quad (8)$$

$$n = \frac{G}{c},$$

gdzie G jest ilością gazu wskaźnikowego dostarczonego do pomieszczenia w celu utrzymania w nim określonego stężenia c , n zaś jest wymianą powietrza odniesioną do jednostki czasu. Istotną zaletą tego typu metody

badan jest utrzymanie w pomieszczeniu niezmiennych warunków oraz możliwość pomijania problematyki absorpcji lub adsorpcji gazu przez powietrze wewnętrzne. Do podstawowych wad zaliczyć należy skomplikowaną aparaturę regulacyjną pozwalającą na utrzymanie z określoną dokładnością koncentracji gazu wskaźnikowego. Stanowi ona jednocześnie o wiarygodności omawianej metody badań [35].

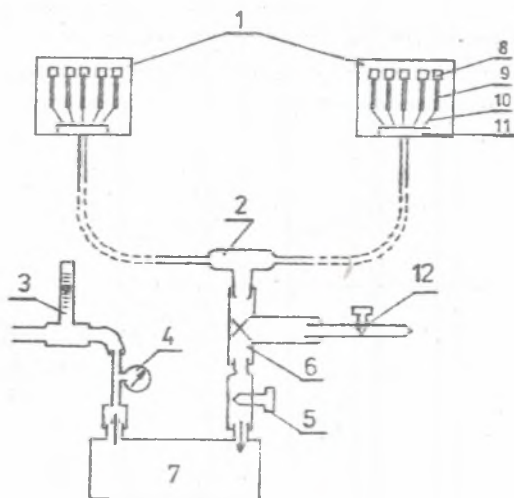


Rys. 5. Przykładowy schemat instalacji do badań wymiany powietrza w pomieszczeniach z wykorzystaniem metody gazowej

1 - zbiornik gazu wskaźnikowego, 2 - zawór magnetyczny, 3 - regulacja przepływu gazu (z pomiarem), 4 - sondy doprowadzające gaz wskaźnikowy do pomieszczenia, 5 - wentylatorki mieszające, 6 - sondy pobierające gaz do analizatora, 7 - badane pomieszczenie

Fig. 5. Exemplary diagram of the system for testing air exchange in rooms with the use of tracer gas method

1 - tracer gas reservoir, 2 - magnetic valve, 3 - gas flow control (with measurement), 4 - probes supplying tracer gas into the room, 5 - mixing fans, 6 - probes sampling tracer gas into the analyser, 7 - tested room



Rys. 6. Zasada poboru próbek gazu wskaźnikowego przy pomiarach metodą gazową w kilku pomieszczeniach (schemat)

1 - sondy do poboru gazu wskaźnikowego, 2 - automatyczny pobór próbek z określonych sond (wybór sondy), 3 - rotametr, 4 - manometr, 5 - regulacja przepływu przez pompę, 6 - zawór cylindryczny, 7 - pompa, 8 - zawór cylindryczny, 9 - rurka metalowa, 10 - rurka plastikowa, 11 - łącznik, 12 - zawór iglicowy

Fig. 6. Principle of tracer gas sampling in measurements taken by the tracer gas method in several rooms (diagram)

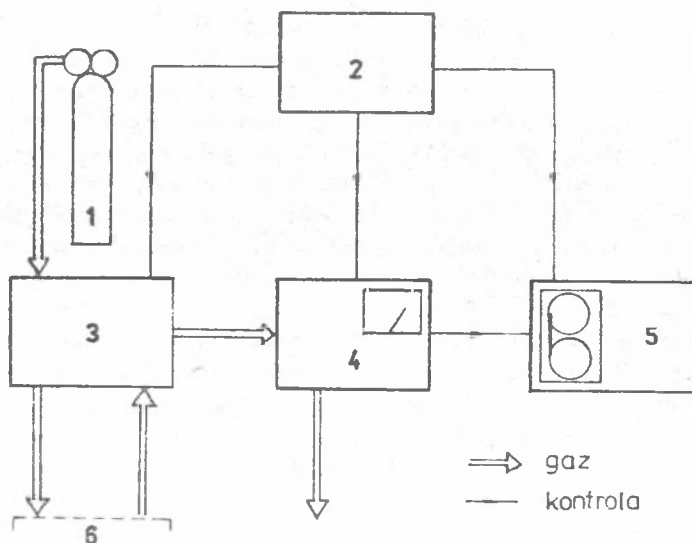
1 - sampling probes for tracer gas, 2 - automatic sampling from specified probes (probe selection), 3 - rotameter, 4 - pressure gauge, 5 - pump inlet flow control, 6 - three-way valve, 7 - pump, 8 - three-way valve, 9 - metal tube, 10 - plastic pipe, 11 - manifold (connector), 12 - needle valve

Odmianą powyżej opisanej metody jest badanie wymiany powietrza za pomocą dostarczania stałego strumienia gazu wskaźnikowego. W metodzie tej, na podstawie pomiaru stężenia gazu wtryskiwanego do pomieszczenia w określonym czasie, bada się ilość powietrza wymiennego z otoczeniem

$$\dot{V}_1 = \frac{G}{C} - \frac{V_2}{C} \frac{dc}{dt}, \quad (9)$$

przy czym G jest stałą, niezmienną w trakcie wykonywania badań ilością gazu wskaźnikowego.

Stosowanie każdej z powyżej opisanych metod musi być poprzedzone wyborem rodzaju gazu wskaźnikowego oraz doбором odpowiedniej aparatury pomiarowej i zasad opracowania uzyskanych wyników badań.



Rys. 7. System pomiarowy dla badania wymiany powietrza (schemat)
 1 - zbiornik gazu wskaźnikowego, 2 - mikroprocesor (kontrola), 3 - sondy do rozprowadzenia i poboru próbek powietrza, 4 - analizator gazu, 5 - rejestrator, 6 - badane pomieszczenie

Fig. 7. Measuring system for air exchange testing (diagram)
 1 - tracer gas reservoir, 2 - microprocessor (control), 3 - probes for distributing and sampling the air, 4 - tracer gas analyser, 5 - recorder, 6 - tested room

(1) Stosuje się dużą ilość gazów wskaźnikowych, jak np. dwutlenek i tlenek węgla, podtlenek azotu metan sześciopluorek siarki itp. Największe zastosowanie znajduje sześciopluorek siarki, co wynika z istotnych jego zalet odnośnie do warunków, jakie stawia się gazom wskaźnikowym. Jest on w odpowiednim stopniu nietoksyczny, bezbarwny, bezzapachowy, niepalny, nie powoduje korozji i stabilny cieplnie. Jednocześnie jego gęstość jest podobna do gęstości normalnej powietrza oraz stosunkowo łatwy jest pomiar jego koncentracji a także produkcji. Podobne zastosowanie znajdują metan i podtlenek azotu.

(2) Realizacja badań za pomocą wybranej metody gazowej wymaga określenia zasad przeprowadzenia pomiarów, z których wynika konieczność zastosowania odpowiedniego sprzętu i aparatury pomiarowej. Ilustracją sposobu wykonywania badań może być schemat przedstawiony na rys. 5. Jak widać, podstawową zasadą jest w tym zakresie system automatycznej współpracy zastosowanej aparatury i jednocześnie rejestracji warunków pomiarów.

W większości przypadków stosowane jest także połączenie układów pomiarowych z komputerem umożliwiającym bezpośrednie uzyskiwanie wyników w postaci rejestracji zmian intensywności wymiany powietrza oraz dodatkowym

układem rejestrującym i przekazującym do komputera informacje odnośnie do zmian czynników decydujących o tej wymianie. Zasadę tak zorganizowanych pomiarów przedstawia schematycznie rys. 6 (25). Instalacja pomiarowa składa się więc z aparatów produkujących gaz wskaźnikowy z oprzyrządowaniem i urządzeniami regulującymi jego przekazywanie do pomieszczeń za pomocą przewodów oraz przewodów pomiarowych doprowadzających powietrze wewnętrzne do chromatografów umożliwiających pomiar stężenia gazu i różnego rodzaju przebiegów pozwalających na skojarzenie systemu pomiarowego i obliczeniowego (28). Podane rozwiązanie urządzenia pomiarowo-rejestrującego i obliczeniowego przedstawiono na rys. 7. Stanowi ono jednostkę badawczą umożliwiającą szybkie jej przenoszenie do poszczególnych pomieszczeń oraz uzyskiwanie wyników.

Dokładność pomiarów wymiany powietrza przeprowadzanych za pomocą technik gazowych uzależniona jest przede wszystkim od ilości stosowanego gazu wskaźnikowego oraz dokładności pomiaru zmian jego stężenia, a więc od rodzaju wykorzystanego analizatora gazu. W pomiarach tego typu stosuje się w różnych przedziałach czasowych wahających się od kilku do kilkudziesięciu minut [34, 35].

4. Podsumowanie

Procesy wentylacji budynków mieszkalnych, a przede wszystkim wymiana powietrza uzależniona od naturalnych sił wymuszających jego przepływy są zjawiskami złożonymi i nie zawsze do końca rozpoznanymi. Dlatego też wykorzystywane do ich pomiaru metody powinny odpowiadać określonym wymaganiom. Wymagania te dotyczą nie tylko kompletności w uwzględnianiu poszczególnych czynników decydujących o intensywności wymiany powietrza, ale również sposobu i zasad przeprowadzania badań. Duża ilość oddziałujących jednocześnie czynników stanowi poważne utrudnienie w poprawnym wykonywaniu prac pomiarowych za pomocą tradycyjnych metod polegających na ocenach zmian różnicowania ciśnień na przegrodach budynków i przepływów powietrza w obrębie budynków. Jedynie metody umożliwiające rejestrację wyników badań lub pośrednio przy użyciu komputerów wyników obliczeń pozwalają na określenie rzeczywistej zmienności tych procesów.

W opracowaniu przedstawiono pełny przegląd stosowanych metod pomiarowych w omawianym zakresie, przy czym opis skoncentrowano na metodach pozwalających na rejestrację wyników badań. Porównywane metody można podzielić na dwie grupy w zależności od celu wykonywanych badań. Z przeprowadzonego zestawienia wynika, że:

W celu określenia stopnia szczelności przegród budowlanych (lub elementów budowlanych) stosuje się metody oparte na zasadzie technik ciśnieniowych. Informacje te umożliwiają ocenę izolacyjności powietrznej przegród, niezbędnej z punktu widzenia ochrony cieplnej budynków a także w połącze-

niu z wykorzystaniem danych odnośnie do układów różnic ciśnień i modeli cyfrowych w zakresie obliczeń przepływów powietrza - na szacunkową analizę procesów wentylacyjnych kształtujących się w budynku.

Jedyną poprawną metodą badania wymiany powietrza jest zastosowanie techniki gazowej. Umożliwia ona uzyskanie pełnego i realnego obrazu zmian intensywności wymiany powietrza zarówno w poszczególnych pomieszczeniach, jak i w całym budynku. Dodatkową zaletą tak wykonywanych badań jest możliwość analizy zarówno warunków wewnętrznych (parametry mikroklimatu), jak i opracowanie na ich podstawie prostych modeli obliczeniowych w postaci zależności funkcyjnych:

$$n = A(\Delta T) + BW^2 + C, \quad (10)$$

gdzie n jest intensywnością wymiany powietrza w badanej kubaturze, ΔT jest różnicą temperatur wewnętrznych i zewnętrznych, W jest prędkością wiatru, a współczynniki A , B i C określają wpływ pozostałych czynników, charakterystycznych dla budowanego obiektu.

Należy także określić, że ze względu na kompleksowy charakter badań wykonywanych za pomocą technik gazowych jedynie one mogą stanowić podstawę do sprawdzania i weryfikacji modeli matematycznych stosowanych w analizach procesów wentylacji budynków.

LITERATURA

- [1] Nantka M.B.: Zużycie e straty ciepła w wielkopłytowym budownictwie mieszkalnym i możliwości ich ograniczenia. Gospodarka Paliwami i Energią. Nr 7-8, 1984.
- [2] Nantka M.B.: Wymagania a stan istniejący w zakresie kształtowania mikrośrodowiska mieszkalnego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr 26, 1985.
- [3] Praca NB, IOW-OP, Politechnika Śląska: Czynniki warunkujące zmniejszenie zużycia energii na cele ogrzewania i wentylacji budynków mieszkalnych. PR-8, zadanie 5.8.01.07., 1981/85 (nie publikowana).
- [4] Opinia w sprawie oszczędności energii w budownictwie i eksploatacji budynków. Wydział IV Nauk Technicznych PAN, KIL-W, Sekcja Ogrzewnictwa i Wentylacji, 26 maj 1984 (nie publikowana).
- [5] Liddament M.W.: Air ventilation and infiltration calculation techniques. AIC - Review, Energy and Buildings, No 8, 1985.
- [6] Sherman M.D., Grimerud D.T.: Infiltration - pressurization correlation, simplified physical modeling, ASHRAE Trans, part 2 1980.
- [7] Nylund P.O.: Infiltration and ventilation. The Swedish Council for building Research, Stockholm 1980.
- [8] Nantka M.B.: Przenikanie powietrza przez przegrody budowlane - problemy i konsekwencje. COW, Nr 11-12, 1987.
- [9] Liddament M.W., Allen C.W.: The validation and comparison of mathematical models of air infiltration. AIC-TN/11, London 1985.

- [10] Fenstel H.E., Kendom V.M.: Infiltration models for Multicellular Structures - A literature review. *Energy and Buildings*, No. 8 1985.
- [11] Lyberg M.D.: Models of infiltration and natural ventilation. The National Swedish Institute for Building Research, M 83:23, 1983.
- [12] Nantka M.B., Majerski S.: Ustalenie niezbędnych potrzeb cieplnych budynków mieszkalnych. *COW*, Nr 4, 1986.
- [13] Nantka M.B., Majerski S.: Ograniczenie zużycia ciepła w komfort cieplny w pomieszczeniach. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna, listopad, Kraków, 1985.
- [14] Nantka M.B., Sziotka J.: Skuteczność wywiewnej wentylacji mechanicznej w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych. *Biuletyn Branżowy, OBR Barowent*, nr 4, 1980 i Nr 1, 1981.
- [15] Gandemer J.: Champ de pression moyenne sur les constructions usuelles. *CCSTB*, No 187, 1978.
- [16] Gids W.E., Schrijndel L.M., Toon J.A.: Wind Tunnel and on-site pressure distribution measurements on house and its effects on infiltration. *ASARE Fræns.*, part II, 1979.
- [17] Wilson D.J., Pitman W.: Correlating measured infiltration for wind from a single direction. *ASHRAE Trans.*, part 2B, 1983.
- [18] Nantka M.B.: Wpływ dokładności charakterystyk aerodynamicznych szczelin na wiarygodność obliczeń wymiany powietrza w budynkach mieszkalnych. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl.*, Z. 26, 1985.
- [19] Kronvall J.: Air flows in buildings components. *AIC Conference*, London, 1985.
- [20] Shaw C.Y., Jons L.: Air Tightnes and air infiltration of school buildings. 1-st AIC Conference, Windsor, 1980.
- [21] Shaw C.Y. Methods for conducting small-scale pressurization test and air leakage data of multi-story apartment buildings. 1-st AIC Conference, Windsor 1980.
- [22] Shaw C.Y., Sander D.M., Tamora G.T.: Air leakage measurements of the exterior walls of tall buildings. 1-st AIC Conference, Windsor 1980.
- [23] Tamora G.T.: The calculation of house infiltration rates., *Ashrae Trans.* Part II, 1979.
- [24] Nantka M.B. Theoretical and experimental studies of heat flows due to the air infiltration and ventilation. 7-Inter. Confer. VHC, Pięstany 1984.
- [25] 1-st AIC Conference - Air Infiltration Measurements. Windsor 1980.
- [26] Etheridge D.W.: The British gas multi - cell model for calculating ventilation. *ASHRAE Trans.* Part II, 1980.
- [27] Turiel J., Rudy J.V.: Occupant-generated CO₂ as an indicator of ventilation rate. *ASHRAE Trans.*, part. 1, 1982.
- [28] Kvisgaard B.: The user's influence on air infiltration. *AIC and V-Revvev*, Vil. 6, No. 4, 1985.
- [29] Nantka M.B.: Metody pomiaru infiltracji powietrza. *Mat. Konf. N-T, PAN*, Krynica 1986.
- [30] Warren P.R., Webb B.C.: The relationship between tracer gas and pressurization techniques in dwellings. 1-st AIC Conference, Windsor 1980.
- [31] ASTM Symposium on - Measured Air leakage Performace of Buildings, Philadelphia 1984.
- [32] Grimstad D.T., Sherman M.H.: Infiltration - pressurization correlations: detailed measurements on a California house. *ASHRAE Transc.*, part 1, 1979.

- [33] Hartman P., Muchelbach H.: Automatic measurements of air change rate (decay method). 1-st AIC Conference, Windsor 1980.
- [34] Potter J.N.: Effect of fluctuating wind pressure on natural ventilation rates. ASHRAE Trans, part 2, 1979.
- [35] Presily A.K., Lintens G.T.: A comparison of measured and predicted infiltration rates. ASHRAE Trans., part 2B, 1983.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЗДУХООБМЕНА В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ

Резюме

Инфильтрация воздуха и вентиляционные потери тепла составляют большой процент суммарных потерь тепла в жилых зданиях. Одновременно эти процессы важны для микроклимата в помещениях и тоже для качества внутреннего воздуха. По этому требования и действительные требования для вентиляции в домах очень важные. Некоторые ответы можно получить из математических моделей воздухообмена. Для проведения этих вычислений необходимы результаты измерений инфильтрации воздуха и воздухообмена. Измерения этих процессов очень трудоемки. В статье представлены разнообразные методы исследований инфильтрации воздуха и воздухообмена в помещениях в жилых зданиях. Данные эти могут быть основанием для выбора самого лучшего метода.

MEASURING METHODS OF AIR EXCHANGE IN APARTMENT BUILDINGS

Summary

Air infiltration and room ventilation-purposes heat demand can account for a substantial portion of total heat losses in buildings. At the same time, these processes are important also for the microclimate to be maintained in rooms and for the indoor air quality. Therefore, determination of the demands and actual quantity of ventilating air exchanged in buildings is one of more important problems at the moment. Obtaining some of data is possible in consequence of the calculation of air exchange carried out and using mathematical modelling of the air flow process. For checking and verifying these models however, it is necessary to take measurements in existing buildings. Taking such measurements is more difficult concerning simultaneous influence of many factors on the buildings.

A review of various methods for estimation of air filtration and its exchange in the apartment houses has been presented in the paper.

Measuring positions that are necessary for carrying out tests have been compared and selection of the most precise testing technique has been stressed.