

*Marian B. Nantka**, *Magdalena Bieniek***

WENTYLACJA A ŚRODOWISKO WEWNĘTRZNE W BUDYNKACH

Streszczenie

W celu ochrony użytkowników budynków przed niekorzystnym wpływem klimatu zewnętrznego konieczne jest uzyskanie w ich wnętrzu akceptowalnego przez użytkowników stanu klimatu wewnętrznego. Tendencje do oszczędzania energii skutkują nie tylko stosowaniem przegród o większej izolacyjności cieplnej, ale również wykorzystywaniem doskonalszych elementów budowlanych, takich jak, na przykład okna, charakteryzujące się dużą szczelnością. Jednocześnie, w budynkach nowych oraz istniejących od dłuższego czasu są stosowane tradycyjne rozwiązania wentylacji. W takich przypadkach działanie wentylacji jest istotnym czynnikiem dla realizacji wymagań akceptowalnego klimatu wewnętrznego. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczące tej problematyki. Uzyskano je na podstawie kompleksowych pomiarów w budynkach istniejących, komputerowych symulacji procesów wentylacyjnych, a także przez badania ankietowe użytkowników obiektów mieszkalnych i biurowych.

Ventilation and internal environment in buildings

Abstract

In order to protect the users of buildings against unfavourable impact of external climate it is necessary to obtain an internal climate state in their interior, which is acceptable to the occupants. The tendencies to save energy are effective not only in consequence of application of partitions with higher thermal insulating power, but also as a result of use of more perfect building elements, such as for instance windows, which are characterised by high tightness. Simultaneously in new buildings as well as in those existing since a longer time traditional ventilation solutions are used. In such cases ventilation acting is an essential factor for the realisation of an acceptable internal climate. The article presents selected investigation results concerning these problems. They have been obtained on the basis of comprehensive measurements in existing buildings, computer simulations of ventilation processes as well as through questionnaire surveys of users of habitable and office objects.

WPROWADZENIE

W celu ochrony użytkowników budynków przed niekorzystnym wpływem klimatu zewnętrznego niezbędne jest utrzymywanie w pomieszczeniach odpowiedniego stanu klimatu wewnętrznego. Komfort cieplny i odpowiednią jakość powietrza wewnętrznego można uzyskać przez wybór przegród budowlanych o odpowiednich właściwościach oraz sprawne wyposażenie techniczne, w tym głównie systemy centralnego ogrzewania i wentylacji.

Tendencje do oszczędności energii, zużywanej w budynkach, spowodowały konieczność ograniczania strat ciepła. Efektem tego jest między innymi sukcesywny

* Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki.

** Śląskie Środowiskowe Studium Doktoranckie w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach.

wzrost izolacyjności cieplnej i szczelności przegród zewnętrznych oraz stosowanie systemów grzewczych o coraz większych możliwościach ich regulacji. Niestety te pozytywne działania nie dotyczą systemów wentylacyjnych. Systemy te powinny współpracować z układami ogrzewania, o czym jednak często zapomina się podczas projektowania ogrzewania i wentylacji. Brak skutecznych rozwiązań wentylacji doprowadził do niekorzystnych zmian klimatu wewnętrznego i warunków zdrowotnych. Świadomość wpływu tych warunków nie tylko na produkcję, ale także na odpoczynek, zdrowie i bezpieczeństwo ludzi jest coraz większa. Jest to powodem pojawienia się rygorystycznych wymagań, zachęcających producentów do wprowadzania różnego rodzaju urządzeń regulacyjnych z funkcjami nadzoru i sterowania. Teoretycznie, technologie te są wystarczające do uzyskania pożądaných warunków wewnętrznych, przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia energii. W praktyce jednakże, nawet najlepsze regulatory nie zawsze działają zadowalająco. Powód jest prosty: idealne warunki przyjmowane w analizach teoretycznych rzadko występują w rzeczywistości. Dotyczy to nie tylko rozwiązań centralnego ogrzewania, ale głównie naturalnych systemów wentylacyjnych. Jest to oczywisty wynik stosowania małej liczby urządzeń technicznych lub wręcz ich braku, w tego typu systemach wentylacyjnych. Sytuacja taka jest szczególnie charakterystyczna w przypadku budynków szczelnych z naturalną wentylacją. W budynkach tych wraz ze wzrostem szczelności przegród zewnętrznych uzyskuje się małą wymianę powietrza, przy jednoczesnym i stałym wzroście liczby skarg użytkowników na stan klimatu wewnętrznego (Wyon 1993; Fanger 2000; Bluessyn, Cox 2000; Wargocki i inni 1999). Objawy te wskazują na tzw. Syndrom Budynku Chorego (ang. *SBS – Sick Building Syndrome*). Chociaż dokładne zdefiniowanie przyczyn występowania *SBS* jest raczej trudne, skargi na stan klimatu wewnętrznego zgłaszane przez użytkowników można traktować jako dobry wskaźnik oceny tego klimatu, a szczególnie jakości powietrza w pomieszczeniach.

Wentylacja w budynkach jedno- i wielorodzinnych oraz w większości biurowców jest tradycyjną wentylacją naturalną. W budynkach takich, powietrze przepływa z zewnątrz w sposób niekontrolowany przez szczeliny w przegrodach (głównie w oknach), otwarte okna albo przez celowo zastosowane otwory, w wyniku działania sił wyporu termicznego i naporu wiatru. Usuwane jest na zewnątrz przez przewody wywiewne wentylacji grawitacyjnej. W praktyce, przeważająca liczba budynków jest wentylowana jedynie przez nieszczelności w oknach, a rzadko przez częściowo uchylone okna, więc działanie tych przewodów jest przypadkowe (Nantka 1986; Miśniakiewicz 2002; Lubina 2004). Oprócz warunków pogodowych, decydujący wpływ zarówno na działanie przewodów, jak i wymianę powietrza ma zatem szczelność przegród budowlanych (głównie okien). Parametrem określającym ilość powietrza przepływającego przez szczeliny w oknach jest współczynnik przepływu a_0 , zwany również współczynnikiem infiltracji. Według polskich unormowań prawnych (PN-83/B-03430, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 15 stycznia 2002 roku w sprawie szczegółowego zakresu i formy audytu energetycznego, Dz. U. Nr 12, poz. 114) współczynnik ten powinien zawierać się między 0,5 a $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h daPa}^{2/3}$. Przy szczelniejszych oknach

może dochodzić do pojawienia się wielu problemów z poprawnym użytkowaniem pomieszczeń. Wzrasta wilgotność, tworząc środowisko sprzyjające rozwojowi pleśni, grzybów i pojawianiu się różnego rodzaju alergii (Barabasz, Albińska 2003). W szczelnych budynkach istnieje także większe prawdopodobieństwo wystąpienia odwrotnego działania kanałów wentylacyjnych, wzrostu stężenia dwutlenku węgla oraz nasilenia niecałkowitych procesów spalania w domowych urządzeniach gazowych do przygotowywania posiłków i ogrzewania wody (Pach J., Hubalewska-Hołda, Pach D. 2001; Persily 1996; Zyska 1999).

2. BUDYNKI I METODY BADAŃ

Przeprowadzone badania dotyczyły obiektów wielorodzinnych (BW – sześć budynków), jednorodzinnych (BJ – cztery budynki) i biurowców (BB – cztery budynki), położonych w południowych obszarach Polski (Miśniakiewicz 2002; Oparczyk 2002). Widok tych obiektów wraz z rozplanowaniem pomieszczeń przedstawiono na rysunku 1. Wysokość wszystkich budynków wielorodzinnych i biurowych jest podobna i wynosi 18 m (4 piętra) oraz 7 m w przypadku budynków jednorodzinnych (1½ piętra). Kubatura wewnętrzna BW i BB wynosi około 5000 m³, zaś BJ – 455 m³. Stosunek sumarycznej powierzchni powłoki zewnętrznej do kubatury (nazywany także współczynnikiem kształtu) wynosi 0,62/m (BW), 0,648/m (BB) i 0,984/m (BJ). Budynki mieszkalne i biurowe są położone w obszarze miejskim i wykonane z pustaków i prefabrykowanych paneli. Budynki biurowe nie były termomodernizowane, współczynniki przenikania ciepła wynoszą około 1,5 W/m²·K (dla ścian pełnych – 0,8–0,9 W/m²·K i okien – 2,6–3 W/m²·K). Budynki jedno- i wielorodzinne są po modernizacji. Współczynniki przenikania ciepła dla ścian pełnych wynoszą 0,5–0,7 W/m²·K. W większości mieszkań zastosowano nowe i szczelne okna (o ramach drewnianych lub plastikowych). Badane budynki są wyposażone w dwururowe instalacje centralnego ogrzewania z zaworami termostatycznymi (BW) lub bez nich (BB i BJ). Systemy te są zasilane z sieci ciepłowniczych (przez węzły ciepłownicze umieszczone w piwnicach budynków wielorodzinnych i biurowych) lub przez kocioł gazowy (budynki jednorodzinne). Wszystkie budynki mają naturalną wentylację kanałową z przewodami indywidualnymi (1 na rys. 1) lub kanałami zbiorczymi (2 na rys. 1). Budynki jedno- i wielorodzinne wyposażono w urządzenia gazowe do przygotowania posiłków i ogrzewania wody. Piecyki kąpielowe są połączone z kanałami spalinowymi (3 na rys. 1).

Badania wykonywano w trzech etapach. Pierwszy etap stanowiły badania ankietowe. Wykorzystano dwa typy kwestionariuszy. Pierwszy z nich zawierał proste pytania dotyczące komfortu cieplnego, działania wentylacji w oddzielnych pokojach i ryzyka związanego z zanieczyszczeniem wewnętrznym. W kwestionariuszu tym znajdowały się także pytania o wiek respondentów, zdrowie, liczbę pomieszczeń, ich usytuowanie, liczbę użytkowników w mieszkaniach, warunki życia w mieszkaniach (lub pracy w biurze), palenie tytoniu w pomieszczeniach, obecność kurzu, odczucie temperatury i wilgotności powietrza w pomieszczeniu,

prędkości powietrza itp. Drugi typ kwestionariuszy został opracowany przez audytorów, po ich przybyciu do budynku (Miśniakiewicz 2002). W tym kwestionariuszu wskazano dziewiętnaście symptomów składających się na „syndrom budynku chorego”.



Rys. 1. Testowane budynki: BB – budynek biurowy, BW – budynek wielorodzinny, BJ – budynek jednorodzinny; 1 – indywidualny przewód wentylacyjny, 2 – zbiorczy przewód wentylacyjny, 3 – komin spalinowy

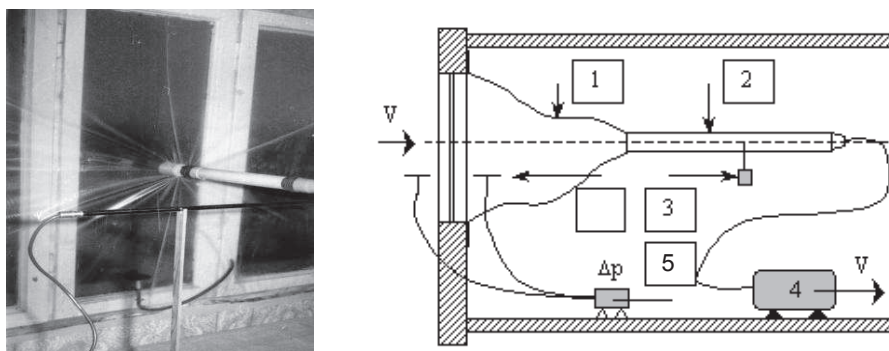
Fig. 1. Tested buildings: BB – office building, BW – multi-family building, BJ – single-family building; 1 – individual ventilation duct, 2 – collective ventilation duct, 3 – flue gas chimney

W celu dokonania szczegółowej oceny wpływu wentylacji na stan środowiska wewnętrznego w drugim etapie badań wykonywano pomiary temperatury i wilgotności względnej, stężenia tlenu i dwutlenku węgla, dwutlenku azotu, formaldehydu, jak również ozonu oraz intensywności wentylacji (Oparczyk 2002). Charakterystykę przyrządów wykorzystanych w pomiarach przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Charakterystyka przyrządów pomiarowych

Parametr	Przyrząd pomiarowy	Dokładność
Temperatura powietrza	VT 300/MM-01	$\pm 0,5$ do 50°C
Wilgotność względna		$\pm 2\%$ mierzonych wartości
Prędkość przepływu powietrza		$\pm 0,02$ m/s + 5% mierzonych wartości
Różnica ciśnień		$\pm 0,5$ do 100 Pa
Stężenie CO_2	Air Tech 2006-SP	± 50 ppm do 10000 ppm
	Solomat MPM4100/PS 30	± 1 ppm do $5000/3000$ ppm
Stężenie CO	Tox-CO	$\pm 1\%$ mierzonych wartości do 200 ppm
Stężenie NO_2 i O_3	UV-2101-PC/SHIMADZU	± 1 mg/m ³ ($\pm 5\%$)
Stężenie HCOH	HP 5890 (FID detektor)	± 1 mg/m ³ ($\pm 10\%$)

Do określenia szczelności okien i drzwi, zastosowano testy ciśnieniowe, wykorzystując szczelne osłony, zwane komorami badawczymi, zakładane na badane elementy (okna lub drzwi – rys. 2). Wentylator połączono z komorą badawczą przewodem o średnicy $0,2$ m i długości około $1,5$ m. Komora została sporządzona z folii plastikowej i uszczelniona wzdłuż obwodu taśmą plastikową (Nantka 1986; Miśniakiewicz 2002). Wydajności powietrza wentylatora zostały zmierzone dostosowaną zwężką z elementem laminarnym (dokładność $\pm 10\%$ mierzonych wartości). Wytwarzane przez wentylator różnice ciśnień mierzono za pomocą przetwornika ciśnieniowego i woltomierza cyfrowego pośrodku badanego elementu (błąd statystyczny 5% skali).

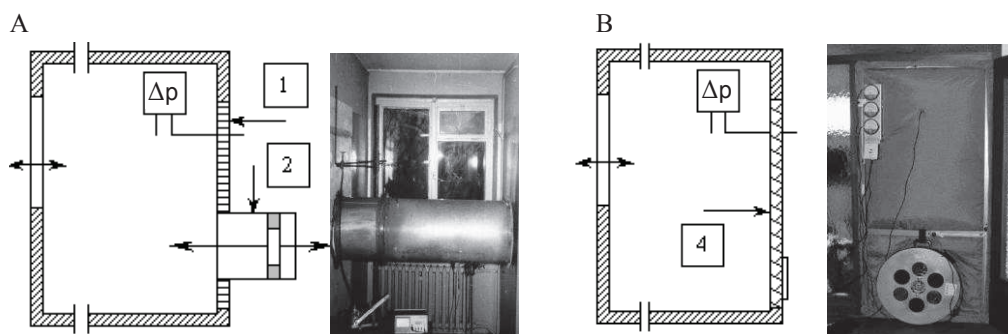


Rys. 2. Stánowisko pomiarowe do testów ciśnieniowych (okien i drzwi): 1 – komora badawcza, 2 – przewód, 3 – anemometr, 4 – wentylator, Δp – różnica ciśnień, 5 – mikromanometr

Fig. 2. Measuring stand for pressure tests (windows and doors): 1 – pressure chamber, 2 – duct, 3 – anemometer, 4 – fan, Δp – pressure difference, 5 – micromanometer

W wybranych pokojach, mieszkaniach i biurach zastosowano tzw. duże testy ciśnieniowe. Użyto dwóch typów stanowisk badawczych (rys. 3). Pierwsze z nich jest własnym projektem (patrz schemat po lewej stronie rys. 3). Zastosowano wentylator osiowy o zmiennym natężeniu przepływu powietrza, który mógł być regulowany ręcznie w celu uzyskania wydajności do 1 m³/s. Wlot wentylatora został połączony przewodem o średnicy $0,4$ m ze specjalnym panelem z drewna zastępującym drzwi wejściowe (fotografia po lewej stronie rys. 3). Testowane przestrzenie badano przy

różnicach ciśnień od 10 Pa do 100–120 Pa, co około 10 Pa. Przy każdej różnicy ciśnień mierzono przepływ powietrza przez pomieszczenie. W podobny sposób wykonywano badania w budynkach jednorodzinnych.



Rys. 3. Stanowiska pomiarowe do testów ciśnieniowych (budynków i pomieszczeń): A, B – testowane pomieszczenia; 1 – panel drzwiowy, 2 – wentylator z przewodem, Δp – różnica ciśnień, 3 – urządzenie Minneapolis Blower Door

Fig. 3. Measuring stand for pressure tests (buildings and rooms): A, B – tested rooms: 1 – door panel, 2 – fan with duct, Δp – pressure difference, 3 – Minneapolis Blower Door device

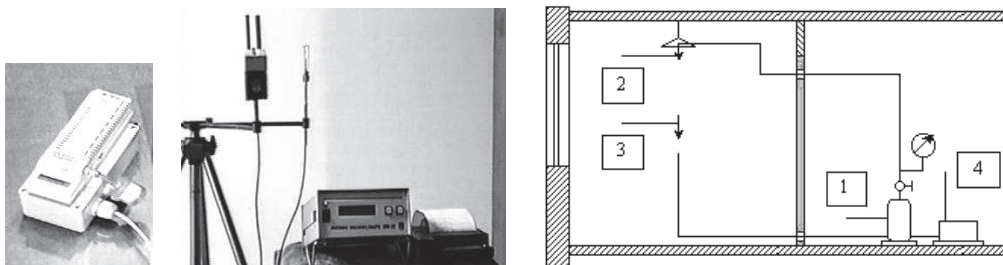
Drugi rodzaj testów polegał także na wytworzeniu w badanej przestrzeni pod- lub nadciśnienia przez uprzednio skalibrowany wentylator umieszczony w płycie plastikowej, która mogła być dopasowana do dowolnych drzwi (rys. 3) (Liddament 1996; Miśniakiewicz 2002; Nantka 1993). W tym przypadku dokładność pomiaru wynosiła $\pm 2\text{--}3\%$ (Nantka 1993).

Wszystkie zastosowane metody polegały więc na pomiarze różnicy ciśnień wytwarzanych przez wentylator między wnętrzem i otoczeniem zewnętrznym. Zmierzone przepływy powietrza przez komorę badawczą lub obudowę badanych pomieszczeń czy budynków (V), przy wytworzonych różnicach ciśnień (Δp), są związane zależnością $V = S(\Delta p)^\alpha$. Badania przepływów powietrza były wykonywane zazwyczaj dla kilkunastu wartości Δp (zwykle Δp zmieniano od 10 Pa do około 100 Pa), a w wyniku ich statystycznej oceny uzyskiwano wartości współczynnika S i wykładnika α . W konsekwencji otrzymano dane mogące posłużyć do oceny wymiany powietrza.

Wymianę powietrza w mieszkaniach i w poszczególnych pomieszczeniach mierzono także metodą testów gazowych, wykorzystując jako znacznik dwutlenek węgla. Schemat zastosowanego stanowiska przedstawiono na rysunku 4. Dwutlenek węgla, do badanych pomieszczeń, wprowadzano sondami wtryskowymi. Po 15–20 minutach pobierano próbki powietrza wewnętrznego i kierowano je do analizatora z rejestratorem (typu Air Tech 2006/SP o dokładności ± 50 ppm). Średnie stężenie CO_2 w czasie pomiarów wynosiło 5000 ppm (wartości maksymalne – 8500 ppm). Pomiary trwały 3–8 godzin. Na podstawie zarejestrowanych zmian stężeń CO_2 obliczano przepływ i wymianę powietrza.

W wybranych pomieszczeniach rejestrowano również zmiany stężeń CO_2 w poszczególnych dniach (urządzeniem Solomat MPM4100/PS-30). Pozwoliło to na

obliczenie wymiany powietrza (Miśniakiewicz 2002; Nantka 1993;). Podczas pomiarów rejestrowano również zmiany parametrów powietrza zewnętrznego (temperatury, prędkości i kierunku wiatru).



Rys. 4. Stanowisko do pomiarów wymiany powietrza metodą znaczników gazowych: 1 – zbiornik gazu ($6 \text{ m}^3 \text{ CO}_2$), 2 – dopływ gazu, 3 – pobór próbki powietrza, 4 – analizator typu Air Tech 2006-SP z rejestratorem

Fig. 4. Stand for air exchange measurements using the gas marker method: 1 – gas container (6 m^3 of CO_2), 2 – gas inflow, 3 – air sampling, 4 – analyser of Air Tech 2006-SP type with recorder

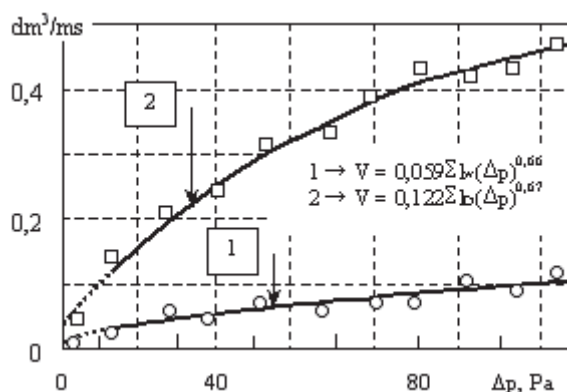
Wydaje się, że opisane pomiary są naturalnym i decydującym sposobem charakteryzowania procesów zachodzących w pomieszczeniach i budynkach. Są one jednak kosztowne, pracochłonne, często kolidują z normalnym użytkowaniem pomieszczeń, a także pojawiają się problemy związane z techniką ich przeprowadzania (Nantka 1996;). Ponadto, dostarczają one danych jedynie dotyczących konkretnej chwili, a nie dłuższego czasu. Wobec tego często korzysta się z analitycznych narzędzi badawczych, a przede wszystkim z symulacji komputerowych. Pomiary dostarczają wtedy danych, które pozwalają na weryfikację wyników symulacji i realizujących je modeli matematycznych.

W następnym etapie badań obliczano przepływy i wymianę powietrza, stosując tego typu narzędzia. Pierwsza z zastosowanych metod polegała na wykorzystaniu jednostrefowego modelu budynku, takiego jak *Infiltracja* i *AIRI* (Nantka 1986; 1993), druga natomiast na zastosowaniu modelu wielostrefowego. Analizy zostały wykonane za pomocą programów autorskich takich jak *Symvent* i *Air-Sym* (Nantka 1996). Wykonywano analizy przepływów powietrza i migracji wybranych zanieczyszczeń. Analizy te zostały wykonane za pomocą programu *ContamW* (Walton 2002). Do badań wybrano tlenek i dwutlenek węgla, jako podstawowe rodzaje zanieczyszczeń związane z użytkowaniem i wyposażeniem pomieszczeń w domowe urządzenia gazowe.

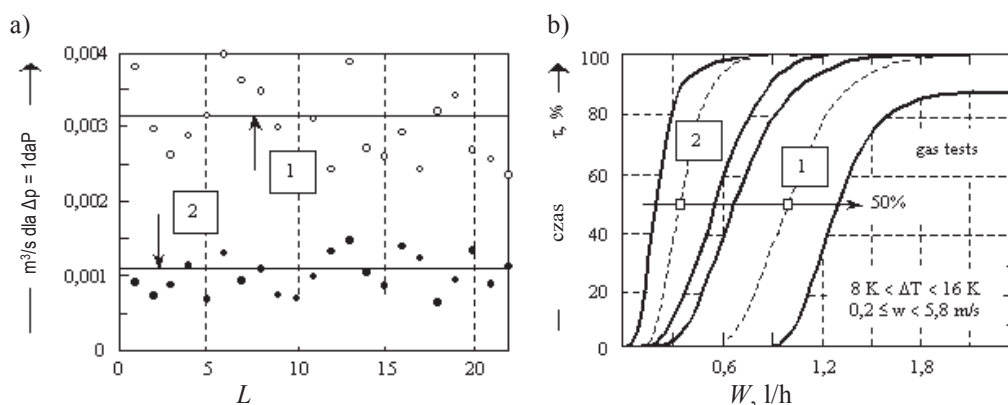
2. WYBRANE WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Wyniki badań szczelności okien i drzwi wejściowych do mieszkań przedstawiono na rysunku 5. Średnie współczynniki przenikania powietrza dla badanych okien wynosiły $0,06 \text{ dm}^3/\text{m}\cdot\text{s}$, a dla drzwi – $0,12 \text{ dm}^3/\text{m}\cdot\text{s}$, przy 1 Pa (lub $1 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$ oraz $2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$ przy 1 daPa). Dla okien wartości te były zgodne z polskimi wymaganiami. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki testów ciśnieniowych oraz testów gazowych dla

22 mieszkań znajdujących się w jednym z badanych budynków wielorodzinnych. Średnio, szczelność przegród po ich modernizacji była około trzy razy większa niż przed modernizacją. W tej sytuacji średnia wymiana powietrza zmniejszyła się z 1,1/h do 0,3/h.



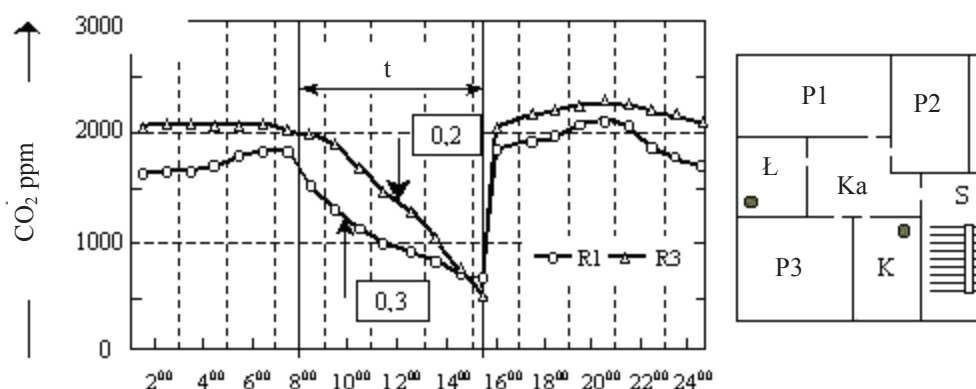
Rys. 5. Wyniki testów ciśnieniowych wykonanych w mieszkaniach w budynkach wielorodzinnych: 1 – okna, 2 – drzwi
 Fig. 5. Results of pressure tests carried out in flats in multi-family buildings: 1 – windows, 2 – doors



Rys. 6. Wyniki testów ciśnieniowych (a) i testów gazowych (b) wykonanych w budynku mieszkalnym (dla $-2^\circ\text{C} < t_e < +10^\circ\text{C}$ i $w < 4,2 \text{ m/s}$): 1 – przed termomodernizacją, 2 – po termomodernizacji, L – liczba pomieszczeń, W – wymiana powietrza

Fig. 6. Results of pressure tests (a) and gas tests (b) carried out in an apartment building (for $-2^\circ\text{C} < t_e < +10^\circ\text{C}$ and $w < 4.2 \text{ m/s}$): 1 – before thermomodernisation, 2 – after thermomodernisation, L – number of rooms, W – air exchange

Przy wykorzystaniu metody zaniku gazu wskaźnikowego uzyskać można także obraz zmienności wymiany powietrza. Przykładem są dane zebrane na rysunku 7 dla dwóch pomieszczeń. Odnotowane, po opuszczeniu pomieszczeń przez użytkowników, zmniejszenie stężenia CO_2 wskazuje, że wymiana powietrza nie przekraczała 0,3/h (średnio 0,2/h).



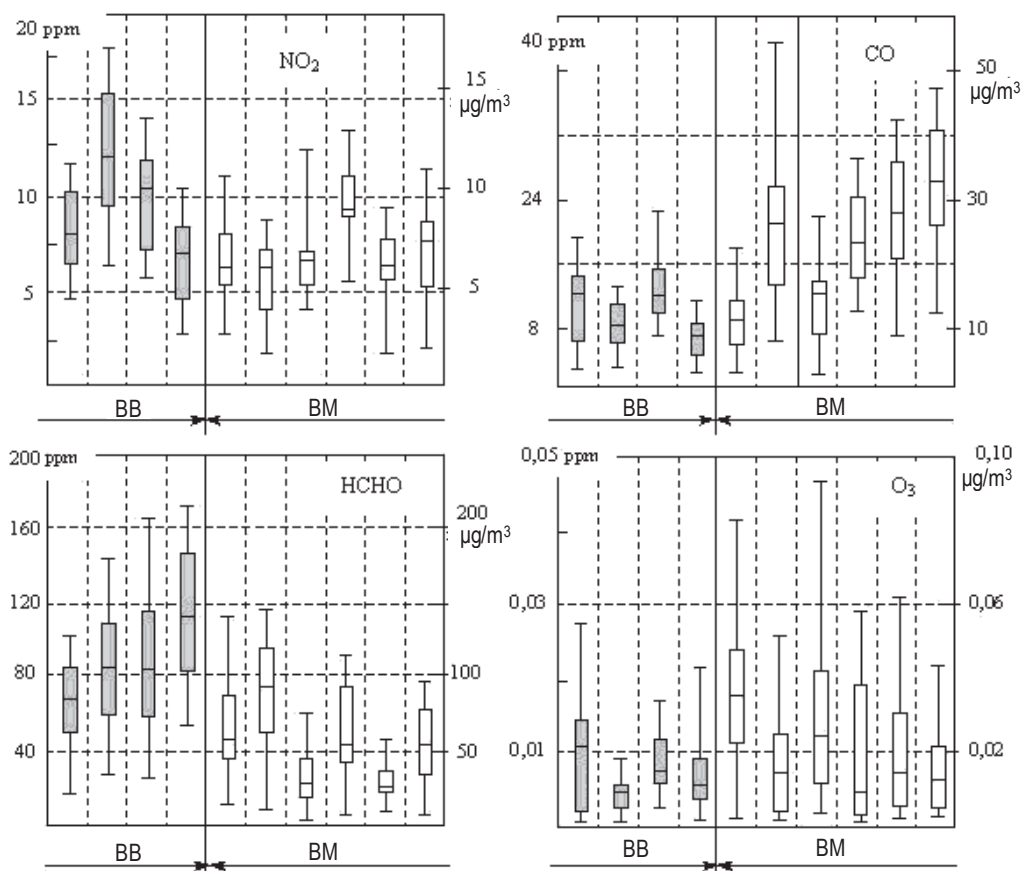
Rys. 7. Stężenie CO₂ w dwóch pokojach P1 i P3 w mieszkaniu w budynku wielorodzinnym dla typowych warunków okresu zimowego ($t_e = 0^\circ\text{C}$, $w = 0,3\text{ m/s}$): t – czas, w którym w pomieszczeniach nie było użytkowników

Fig. 7. CO₂ concentration in two rooms P1 and P3 in a flat in a multi-family building for typical conditions of the winter period ($t_e = 0^\circ\text{C}$, $w = 0.3\text{ m/s}$): t – time, when no users were present in the rooms

Podobne wyniki uzyskano w przypadku budynku jednorodzinego. Średnia wymiana powietrza w budynkach jednorodzinnych wahała się między 0,15/h a 0,2/h. W budynkach badano również stężenia wybranych zanieczyszczeń, takich jak: tlenek węgla, dwutlenek azotu, formaldehyd, ozon. Porównanie tych stężeń zilustrowano na rysunku 8. Średnie stosunki stężeń tych substancji w warunkach wewnętrznych do wartości odnotowanych na zewnątrz ($W/2$) są zawsze większe od 1, szczególnie dla tlenku węgla i formaldehydu (tabl. 2).

Szczegółowymi pomiarami objęto rejestrację zmian stężeń dwutlenku węgla w typowych warunkach użytkowania pomieszczeń. Stężenie CO₂ jest nadal powszechnie uznawane za wskaźnik intensywności wentylacji (Liddament 1996). W pomieszczeniach zależy ono od jego wartości w otoczeniu zewnętrznym i emisji CO₂ z wewnętrznych źródeł. W biurach emisja zależy głównie od procesów metabolicznych i palenia tytoniu, ale w budynkach mieszkalnych znaczący wpływ może mieć również stan i sposób użytkowania domowych urządzeń gazowych i inne źródła wewnętrzne. W celu określenia stężenia CO₂ powinna zostać zmierzona różnica między stężeniami wewnętrznymi i zewnętrznymi. W praktyce stężenie CO₂ w powietrzu zewnętrznym jest zazwyczaj przyjmowane jako stałe, z przedziału 380–410 ppm (średnio 395 ppm). W takim przypadku jest wystarczający pomiar wartości absolutnych i pomniejszenie ich o stałą wartość stężenia CO₂(+) na zewnątrz.

Na rysunku 9 przedstawiono zmiany stężenia CO₂ w trzech badanych biurach. Wynika z niego, że godzinowe średnie stężenie dwutlenku węgla waha się od 405 ppm, podczas przerwy w pracy do około 3000 ppm w godzinach pracy. Maksymalne wartości stężenia CO₂ uzyskuje się podczas palenia tytoniu. Otrzymane w ten sposób okresy spadków stężeń CO₂ pozwoliły na obliczenie wymiany powietrza w poszczególnych pomieszczeniach.



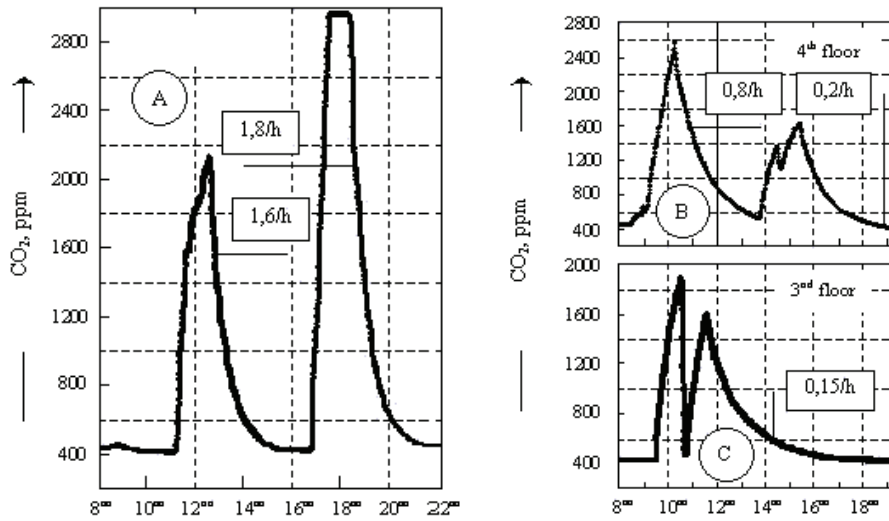
Rys. 8. Stężenie dwutlenku azotu (NO₂), tlenku węgla (CO), formaldehydu (HCHO) i ozonu (O₃) we wszystkich badanych budynkach: BB – budynki biurowe, BM – budynki mieszkalne

Fig. 8. Concentration of nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), formaldehyde (HCHO) and ozone (O₃) in all tested buildings: BB – office buildings, BM – apartment buildings

Tablica 2. Średnie wartości wskaźnika W/2 w typowych warunkach użytkowania pomieszczeń (BM = BJ + BW)

Rodzaj zanieczyszczenia	Wskaźnik W/2	
	budynki mieszkalne BM = BJ + BW	budynki biurowe BB
Dwutlenek węgla (CO ₂)	1,34–7,55	1,02–1,94
Formaldehyd (HCHO)	4,7–11,8	9,6–15,5
Dwutlenek azotu (NO ₂)	0,9–3,1	1,0–2,5
Ozon (O ₃)	1,0–1,8	1,4–2,1

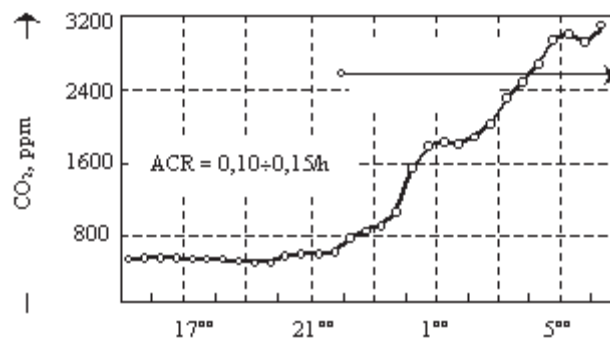
Stwierdzono, że po wyjściu użytkowników z pomieszczenia, stosunek W/Z był niewiele większy od 1. Podczas użytkowania pomieszczeń, stosunek ten może być znacznie większy od 1.



Rys. 9. Zmiany stężeń CO_2 w czasie pomiarów ciągłych w trzech pomieszczeniach biurowych w czasie ich użytkowania (w typowych warunkach zimowych): A – biuro, znajdujące się na parterze, wyposażone w stare okna, z możliwością palenia tytoniu, B – biuro, na czwartym piętrze, wyposażone w nowe szczelne okna, z możliwością palenia tytoniu, C – biuro, na trzecim piętrze wyposażone w nowe szczelne okna, bez możliwości palenia tytoniu

Fig. 9. Changes of CO_2 concentrations during continuous measurements in three office rooms in the time of their use (in typical winter conditions): A – office on the first floor, equipped with old windows, with possibility of smoking, B – office on the fifth, floor equipped with new tight window with possibility of smoking, C – office on the fourth floor equipped with new tight windows, without possibility of smoking

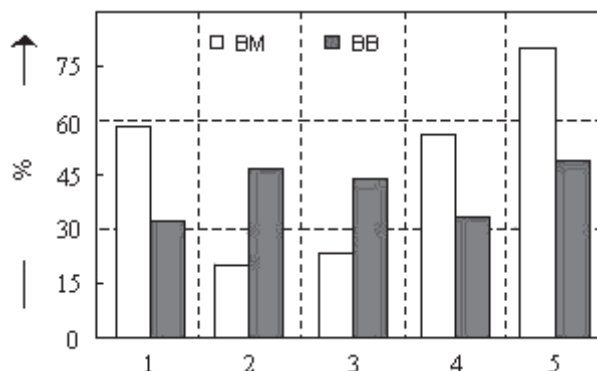
Wymiana ta w znacznym stopniu zależy od szczelności okien oraz usytuowania pomieszczenia w budynku, a także od sposobu użytkowania pomieszczenia. Podobne zmiany zaobserwowano w pomieszczeniach mieszkalnych (rys. 10). W tym przypadku stężenie dwutlenku węgla zmieniało się także od około 400 ppm do 3000 ppm (lub więcej), a średnia wymiana powietrza wynosiła około 0,1/h.



Rys. 10. Zmiany stężenia dwutlenku węgla CO_2 w budynku wielorodzinnym wyposażonym w nowe szczelne okna, w sypialni znajdującej się na pierwszym piętrze 4-kondygnacyjnego budynku użytkowanej przez dwie osoby (w okresie zimy)

Fig. 10. Changes of carbon dioxide (CO_2) concentration in a multi-family building equipped with new tight windows in a sleeping room on the second floor of a four-storey building used by two persons (during the winter season)

Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzono badaniami ankietowymi. W badaniach tych uczestniczyło 2982 z 3523 respondentów (85%). Wśród nich 55% stanowiły osoby młodsze, poniżej 50 lat. W całej populacji 33% to osoby między 20 i 40 rokiem życia, a 12% to dzieci (poniżej 10 lat). Analiza kwestionariuszy wykazała brak akceptacji wszystkich wymienionych parametrów (rys. 11). Szczególną uwagę zwracają negatywne opinie o działaniu wentylacji w budynkach (w mieszkaniach nawet do około 80%).



Rys. 11. Ocena przez użytkowników wybranych parametrów stanu środowiska wewnętrznego w pomieszczeniach: 1 – gorąco, 2 – zimno, 3 – suche powietrze, 4 – duża wilgotność, 5 – zła wentylacja (brak świeżego powietrza) (I typ badań ankietowych)

Fig. 11. Assessment performed by users of selected parameters of the internal environment state in rooms: 1 – hot, 2 – cold, 3 – dry air, 4 – high humidity, 5 – bad ventilation (lack of fresh air) (I type of questionnaire surveys)

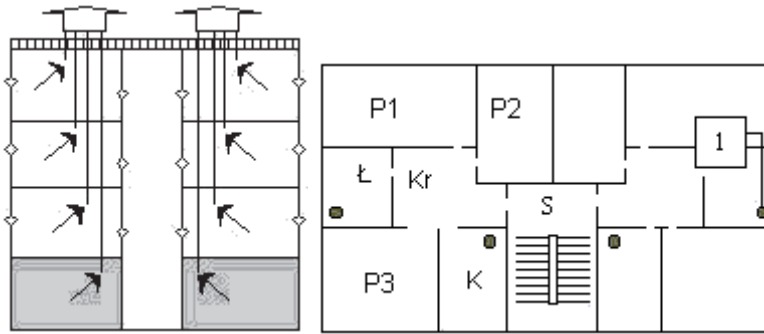
Podobne opinie dotyczyły innych parametrów. Przeciętnie, 17–58% użytkowników mieszkań i 32–47% pracowników biur, uskarżało się na zbyt wysoką lub niską temperaturę powietrza wewnętrznego. Znaczący był także procent mieszkańców uskarżających się na zbyt dużą wilgotność (średnio ponad 50%).

Analiza drugiego typu ankiet pozwoliła na określenie najczęściej występujących symptomów zdrowotnych. Szczególnie duża liczba skarg dotyczyła bólów i zawrotów głowy, podrażnienia oczu i ogólnego zmęczenia. Respondenci zgłosili także stosunkowo dużą częstość występowania objawów alergii, astmy i zapalenia oskrzeli. Stosunkowo duży procent respondentów nie był zadowolony z parametrów środowiskowych, takich jak nadmierny ruch powietrza i zapylenie.

Następny etap badań polegał na wykorzystaniu metod analitycznych (modeli matematycznych). Badania te skoncentrowano głównie na obliczaniu przepływów i wymiany powietrza oraz stężeń metabolicznego dwutlenku węgla. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki badań wykonanych w mieszkaniu znajdującym się na parterze jednego z budynków mieszkalnych (rys. 12).

Do obliczeń przyjęto wartości współczynników przenikania powietrza przez okna równe $1 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$ i przez drzwi – $2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$ dla 1 daPa lub $0,06 \text{ dm}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ i $0,12 \text{ dm}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ dla 1 Pa (zgodne z wartościami zawartymi w normach i wynikami pomiarów – także rys. 5). Założono, że w budynku jest wentylacja naturalna (grawitacyjna) z indywidualnymi kanałami (o wymiarach $0,14 \times 0,14 \text{ m}$) oraz otworami wywiewnymi

umieszczonymi w kuchniach i łazienkach. Profile użytkowania mieszkań przyjęto na podstawie wyników badań ankietowych (Lubina 2004). Założenia te zebrano w tablicy 3. Dane meteorologiczne (temperatura zewnętrzna, kierunki i prędkości wiatru) wykorzystane w badaniach dotyczyły rzeczywistych zmian parametrów klimatu w sezonie grzewczym odnotowywanych w Katowicach z 1-godzinnym krokiem czasowym.



Rys. 12. Przekrój budynku i rozkład pomieszczeń w jednym z mieszkań: P1, 2, 3 – pokoje, Ł – łazienka, K – kuchnia, Kr – korytarz, 1 – przewody wentylacji grawitacyjnej

Fig. 12. Cross-section of building and room distribution in one of the flats: P1, 2, 3 – rooms, Ł – bathroom, K – kitchen, Kr – corridor, 1 – gravitational ventilation ducts

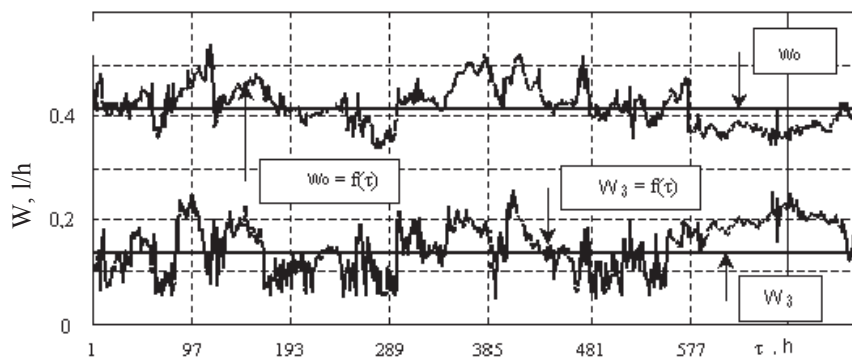
Tablica 3. Profile czasowe użytkowania pomieszczeń

	Godziny doby																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	P1			Ł		pobyt poza mieszkaniem										P1			Ł	P1				
B	P1			Ł		pobyt poza mieszkaniem										K	P2			Ł	P2			
C	P3				Ł		pobyt poza mieszkaniem							P3	P1	Ł	P3							
D	P3				Ł		pobyt poza mieszkaniem							P3	P1	Ł	P3							
E	pobyt poza mieszkaniem										P2	P3	K	pobyt poza mieszkaniem										
A – osoba dorosła (o wadze 80 kg) i emisji CO ₂ równej 10·10 ⁻⁶ m ³ /s, B – osoba dorosła (o wadze 60 kg) i emisji CO ₂ równej 10·10 ⁻⁶ m ³ /s, C – dziecko (o wadze 45 kg) i emisji CO ₂ równej 6·10 ⁻⁶ m ³ /s, D – dziecko (o wadze 35 kg) i emisji CO ₂ równej 6·10 ⁻⁶ m ³ /s, E – osoba dorosła (o wadze 60 kg) i emisji CO ₂ równej 10·10 ⁻⁶ m ³ /s.																								

Pierwsza grupa uzyskanych danych obliczeniowych dotyczyła zmienności wymiany powietrza w całych mieszkaniach. Zmienność tę, dla mieszkań położonych na parterze i ostatnim piętrze badanego budynku, przedstawiono na rysunku 13. Średnie wartości wymiany powietrza w styczniu wahały się od około 0,13/h (mieszkanie znajdujące się na najwyższym piętrze) do 0,42/h (mieszkanie znajdujące się na parterze) i były mniejsze o około 50% od wymaganych wartości ($\cong 1/h$).

Druga grupa danych dotyczyła zmienności strumieni powietrza przepływających przez poszczególne mieszkania. Na rysunku 14 przedstawiono przykład takich zmian w pomieszczeniach mieszkania znajdującego się na parterze badanego budynku (dla stycznia). Uzyskane dane są charakterystyczne dla wszystkich mieszkań z wentylacją

naturalną. Do typowych stanów można zaliczyć przepływ wsteczny w jednym z przewodów wywiewnych. Dotyczyło to przewodu kuchennego (V_{OK} na rys. 14). Natężenie przepływu powietrza w badanych mieszkaniach i pokojach wskazuje na praktyczny brak wymiany powietrza. Ilość powietrza przypadająca na pojedynczą osobę zmieniała się od $0,58 \text{ dm}^3/\text{s}$ – w pokoju P1 do $1,15 \text{ dm}^3/\text{s}$ – w pokoju P3.



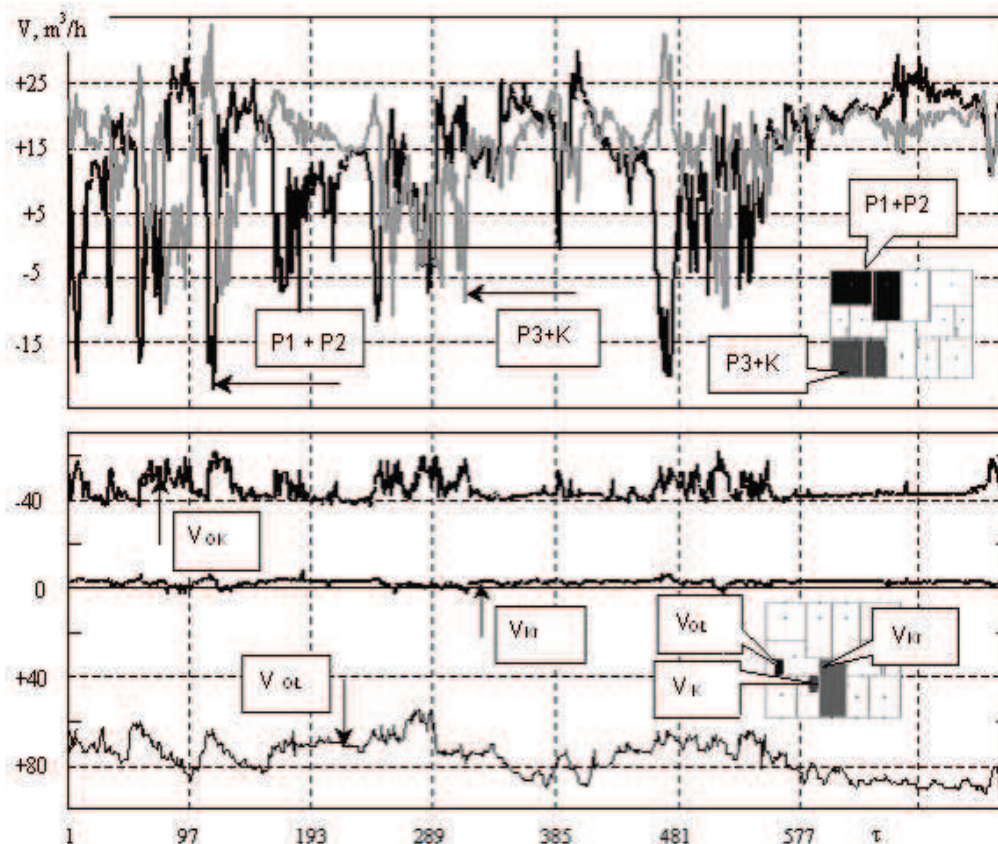
Rys. 13. Zmienność wymiany powietrza w wybranych mieszkaniach budynku wielorodzinnego (współczynnik szczelności okien: $1 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{h}$ dla 1 daPa lub $0,06 \text{ dm}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ dla 1 Pa): W_0 i W_3 – wymiana powietrza w mieszkaniach zlokalizowanych na parterze i ostatnim (trzecim piętrze), τ – czas, W – wymiana powietrza

Fig. 13. Changeability of air exchange in selected flats of a multi-family building (coefficient of window tightness: $1 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{h}$ for 1 daPa or $0.06 \text{ dm}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ for 1 Pa): W_0 and W_3 – air exchange in flats located on the first floor and last floor (fourth floor), τ – time, W – air exchange

W innych mieszkaniach przepływy powietrza były podobne, a średnie wartości stężeń CO_2 wahały się od 3000 do 5500 ppm (rys. 15). Również niebezpieczeństwem w mieszkaniach wyposażonych w tego typu urządzenia gazowe jest okresowy wzrost stężenia produktów częściowego spalania gazu (głównie CO) i ich swobodna migracja w pokojach i całym budynkach.

Wzrost stężenia zanieczyszczeń zależy przede wszystkim od szczelności okien, warunków pogodowych oraz miejsca usytuowania pomieszczenia wzdłuż wysokości budynku. Potwierdzają to także dane przedstawione na rysunku 16. Dużej szczelności okien odpowiadają również duże stężenia tlenu węgla. Maksymalne stężenia CO pojawiają się głównie w mieszkaniach znajdujących się na najwyższych piętrach. W łazienkach wartości tych stężeń są kilkakrotnie większe niż w kuchniach.

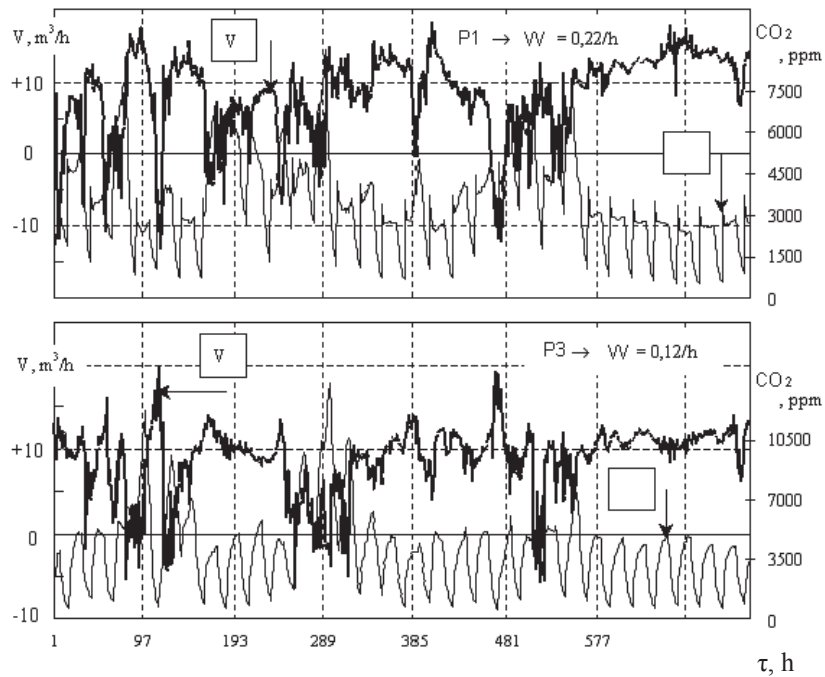
Przykładowo, w mieszkaniach z oknami o współczynniku szczelności zgodnym z normami (tzn. $1 \text{ m}^3/\text{mh}$ dla 1 daPa), stężenie CO przekraczało znacznie wartość dopuszczalną (tzn. około $6 \text{ mg}/\text{m}^3$). Na wartość stężenia wpływa wiele dodatkowych czynników, które w analizach również nie powinny być pomijane. Można do nich zaliczyć warunki pogodowe i związane z nimi siły napędowe wentylacji naturalnej: wypór termiczny i napór wiatru. Szczególnie duże zagrożenie użytkowników występuje w klimatycznych okresach przejściowych (wiosna, jesień), w których o przepływach powietrza decyduje głównie wiatr o losowo zmiennych kierunkach i prędkościach. Warunki niebezpieczne mogą występować w znacznie dłuższym czasie w przypadku budynku znajdującego się w terenie pofałdowanym lub na



Rys. 14. Zmienność natężenia przepływu powietrza w mieszkaniu znajdującym się na parterze, w styczniu, (współczynniki przenikania powietrza przez okna wynosiły $1 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{h}$ dla różnicy ciśnień 1 daPa lub $0,06 \text{ dm}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ dla różnicy ciśnień 1 Pa): $VP1 + P2$, $VP3 + K$ – przepływ powietrza przez nieszczelności w oknach, V_{KR} – jw., ale przez nieszczelności w drzwiach (z klatki schodowej), V_O – wywiew powietrza przez przewód wentylacji grawitacyjnej (V_{OK} – z kuchni, V_{OL} – z łazienki), τ – czas

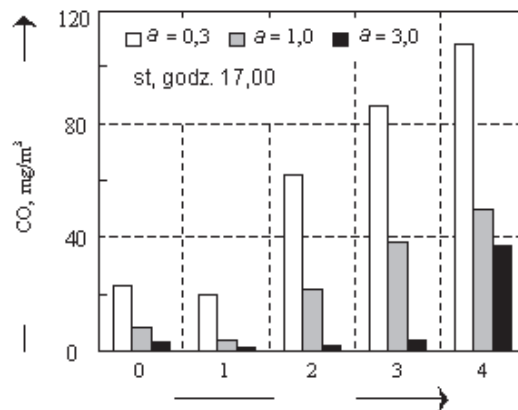
Fig. 14. Changeability of air flow intensity in a flat on the first floor, in January (coefficients of air penetration through windows amounted to $1 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{h}$ for pressure difference 1 daPa or $0.06 \text{ dm}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ for pressure difference 1 Pa): $VP1 + P2$, $VP3 + K$ – air flow through leakages in windows, V_{KR} – as above, but through leakages in doors (from the staircase). V_O – air exhaust though the gravitational ventilation (V_{OK} – from the kitchen, V_{OL} – from the bathroom), τ – time

obszarach zwartej zabudowy (np. centra miast). Charakterystyczna jest liczba godzin w sezonie zimowym ze stężeniami CO przekraczającymi wartości dopuszczalne. Liczba ta w przypadku badanych budynków wielorodzinnych wahała się od 100 do około 150 godzin (a nawet 200 godzin) (Miśniakiewicz 2002; Nantka 1996). W praktyce oznacza to, że w około 75% roku występuje duże ryzyko zagrożenia zdrowia, a nawet życia użytkowników. Otrzymane wyniki mogą zostać użyte do prognozowania tych zagrożeń. Należy zauważyć, że w słabo wentylowanych pomieszczeniach z urządzeniami gazowymi (głównie w bezokiennych łazienkach) wzrostowi stężenia CO_2 towarzyszy zmniejszenie stężenia tlenu. W takich warunkach, podczas użytkowania urządzeń gazowych jest obserwowany wzrost stężenia CO.



Rys. 15. Zmienność natężenia przepływu powietrza (V) i stężenia dwutlenku węgla CO_2 dla dwóch pokoi (P1 i P3) dla współczynników przenikania powietrza przez okna $1 m^3/m \cdot h$ dla różnicy ciśnień $1 daPa$ lub $0,06 dm^3/m \cdot s$ dla różnicy ciśnień $1 Pa$ (dla stycznia), τ – czas

Fig. 15. Changeability of air flow intensity (V) and carbon dioxide (CO_2) concentration for two rooms (P1 and P3) for coefficients of air penetration through windows $1 m^3/m \cdot h$ for pressure difference $1 daPa$ or $0.06 dm^3/m \cdot s$ for pressure difference $1 Pa$ (for January), τ – time



Rys. 16. Zależność stężenia tlenku węgla CO w pomieszczeniach od współczynnika przenikania powietrza – a – dla okien w 5-kondygnacyjnym budynku w okresie zimy (współczynniki przenikania powietrza wyrażono w $m^3/m \cdot h$ dla różnicy ciśnień $1 daPa$)

Fig. 16. Dependence of carbon monoxide (CO) concentration on the coefficient of air penetration for windows – a – in a five-storey building during the winter season (coefficients of air penetration have been expressed in $m^3/m \cdot h$ for the pressure difference $1 daPa$)

Tlenek węgla ma duże powinowactwo do hemoglobiny (około 200 razy większe niż tlen). W efekcie, w organizmie człowieka tworzy się karboksyhemoglobina (HCOb), będąca związkiem potęgującym objawy niedotlenienia. Zgodnie z badaniami May'a (Pach J., Hubalewska-Gołda, Pach D. 2001; Persily 1996) już 60–65% stężenia tego związku we krwi uważa się za śmiertelne. W większości badanych łazienek z gazowymi piecykami kąpielowymi stężenie to (określone na podstawie wykresu May'a), już po 5–7 minutach przekraczało wartość 40%. Stwarza to ryzykowne warunki, potwierdzone już wieloletnią praktyką. Corocznie jest odnotowywanych kilka tysięcy przypadków silnych zatruc użytkowników, z których około 10% kończy się ich śmiercią. Ponadto należy pamiętać, że około 15% wchłoniętego przez organizm tlenu węgla jest wiązana z proteinami pozanaczyniowymi i może być także przyczyną wielu różnych chorób.

PODSUMOWANIE

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów i badań analitycznych można sprecyzować następujące wnioski:

- Poprawne działanie wentylacji naturalnej jest w świadomości użytkowników sprawą oczywistą. Jej zaprojektowanie jest jednak trudne, co wynika nie tylko z występowania wielu czynników (często kształtowanych losowo), ale również z konieczności współuczestniczenia użytkowników w procesach wymiany powietrza.
- Rozwiązania wentylacji naturalnej w badanych budynkach są niedostosowane do ich struktury i sposobów użytkowania pomieszczeń. Działanie kanałów wentylacyjnych jest przypadkowe i w znacznym stopniu zależy od warunków pogodowych i szczelności okien.
- Charakterystyczne obecnie uszczelnianie okien i powszechna ich zamiana na okna o dużej szczelności powodują, że przepływy powietrza są minimalne, a wymiana powietrza jest bliska zeru. W praktyce waha się ona od 0,1/h do niewiele ponad 0,4/h. Odpowiada jej duże stężenie CO₂, przekraczające zazwyczaj 3000 ppm.
- Niedostateczna wymiana powietrza jest jedną z głównych przyczyn występowania w pomieszczeniach nadmiernych stężeń różnych substancji zanieczyszczających, a także negatywnego odbioru warunków wewnętrznych przez użytkowników.
- Kształtowanie jakości powietrza i występowanie wielu symptomów chorobowych, a tym samym zagrożeń nie tylko zdrowia użytkowników jest uzależniona od intensywności wentylacji.
- Głównym zagrożeniem w budynkach (szczególnie w budynkach wielorodzinnych), wyposażonych w urządzenia gazowe do przygotowywania ciepłej wody i posiłków, jest okresowy wzrost stężeń produktów niecałkowitego spalania gazu (głównie CO) i jego migracji w pomieszczeniach i budynkach; w okresie wiosny i jesieni częste są przypadki kilkunastokrotnego przekroczenia stężenia dopuszczalnego CO.

Podziękowania

Publikacja została opracowana na podstawie wyników badań wykonanych przy współudziale Polskiego Zrzeszenia Techników i Inżynierów Sanitarnych oraz Zakładu

Ekspertyz, Projektów i Usług Technicznych, którym autorzy składają serdeczne podziękowania. Autorzy dziękują także dużej grupie absolwentów Politechniki Śląskiej za ich wkład w wykonywane badania.

Literatura

1. Wyon D.P. (1993): *Healthy Buildings and their Impact on Production*. Environmental Technology 13, s. 313–322.
2. Fanger P.O. (2000): *Indoor air quality in the 21 century*. Indoor Air 10, s. 68–73.
3. Bluessyn P.M., Cox C. (2000): *Indoor environment quality and upgrading of European office buildings*. Energy and Buildings 34, s. 155–162.
4. Wargocki P. i inni (1999): *Perceived air quality, sick building syndrome symptoms (SBS) and productivity in an office with two different pollution loads*. Indoor Air 9, s. 165–179.
5. Liddament M.W. (1996): *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. Air Infiltration & Ventilation Centre, Coventry/Berkshire 1996.
6. Nantka M.B. (1986): *Air Infiltration and Ventilation in Relation to the Thermal Performance of Dwelling Houses*. Building Services Engineering, Research and Technology, London, Vol. 7, No. 1, s. 11–19.
7. Carlsson P. i inni (1980): *Airtightness in Buildings*. Swedish Building Research Publishing, D37, Informationprojekt AB, Stockholm.
8. Miśniakiewicz E. (2002): *Wymiana powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych i jej wpływ na jakość powietrza wewnętrznego*. Opole.
9. Lubina P. (2004): *Badanie zmienności wewnętrznych zysków ciepła z uwagi na dynamikę potrzeb cieplnych w budynkach*. Gliwice, Politechnika Śląska (Praca doktorska).
10. Barabasz W., Albińska D. (2003): *Warunki występowania grzybów pleśniowych i zagrożenia zdrowia spowodowane przez nie w budownictwie mieszkaniowym*. Materiały sympozyjne pt. Techniczne, medyczne i prawne aspekty bezpieczeństwa użytkowników pomieszczeń. Kraków, AGH, s. 47–56.
11. Pach J., Hubalewska-Hołda A., Pach D. (2001): *Scintigraphic detection of cardiac injury of actually carbon monoxide poisoned patients*. Journal of Toxicol. Clin. Toxicol. 2001, 522.
12. Persily A.K. (1996): *Carbon Monoxide Dispersion in Residential Buildings*. National Institute of Standards and Technology 5906, USA.
13. Zyska B. (1999): *Zanieczyszczenia biologiczne w budynkach*. Warszawa, Wydaw. Arkady.
14. Oparczyk G. (2002): *Badania zanieczyszczeń atmosfery wewnętrznej w pomieszczeniach mieszkalnych i biurowych*. Gliwice, Politechnika Śląska (Praca doktorska).
15. Nantka M.B. (1993): *New Concepts Aimed to Improve the Multizone Mode for Predicting Air Flows in the Building*. W: Proceedings of International Congress on Indoor Air, Vol. 5, Helsinki, s. 563–569.
16. Nantka M.B. (1996): *A Method for Prediction of Air Flows in Multizone Buildings*. Archives of Civil Engineering, Polish Scientific Academy, Vol. XLII, No. 2, s. 237–267.
17. Walton G.N. (2002): *ContamW*. National Institute of Standards and Technology Documents, No. 5385. Gaithersburg, USA.

Recenzent: dr inż. Krystian Kadlewicz