



Przenikanie powietrza przez przegrody budowlane Problemy i konsekwencje*)

1. Przepływy powietrza w budynkach

Mechanizm kształtowania się przepływów powietrza zewnętrznego do pomieszczenia przedstawiono na rysunku 1. Pomieszczenia te kontaktują się z otoczeniem przez przepuszczalne dla powietrza elementy budowlane oraz kanały wentylacyjne. O intensywności tego kontaktu decyduje jednocześnie i trudny do przewidzenia wpływ czynników wewnętrznych, zewnętrznych i związanych z zastosowaną wentylacją. Powodują one, że na przegrodach zewnętrznych tworzą się zróżnicowane układy różnicy ciśnień. Różnice te używane są na pokonanie oporów przepływu powietrza przegrody. Charakter tych procesów opisuje równanie:

$$\Delta p = k(V)^{-\alpha} \quad \text{daPa} \quad (1)$$

które jest podstawą tzw. charakterystyki aerodynamicznej

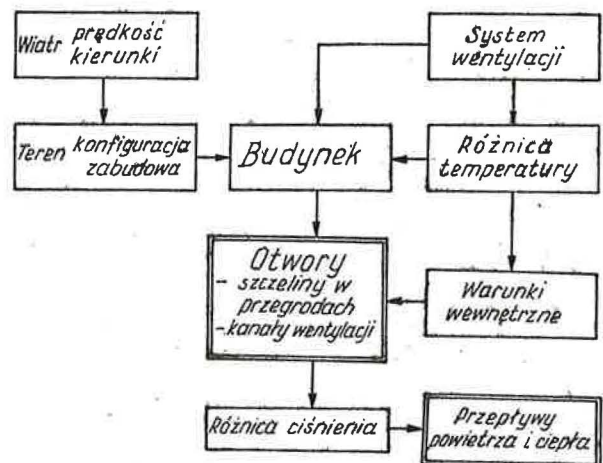
$$V = a \Sigma l (\Delta p)^{\alpha} \quad \text{m}^3 \text{h}^{-1} \quad (2)$$

gdzie:

- Σl — sumaryczna długość szczelin, m,
- a — współczynnik przenikania powietrza, $\text{m}^3/\text{mh} \cdot \text{daPa}$,
- α — wykładnik zależny od rodzaju ruchu powietrza i konstrukcji szczeliny.

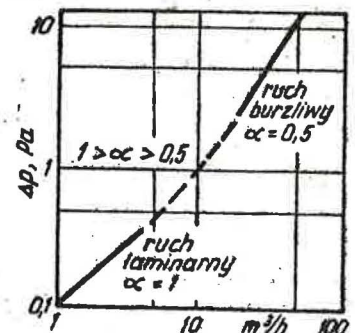
Charakter zależności (2) przedstawiono na rysunku 2. Przy małych wartościach różnicy ciśnienia dominujący jest wpływ lepkości powietrza i zależność ta ma charakter liniowy ($\alpha=1$). Przy wzroście różnicy ciśnienia dominuje energia kinetyczna, a ruch powietrza staje się burzliwy ($\alpha=0,5$) [1, 2].

Przepływy powietrza przez budynki zależą jednak nie tylko od nieszczelności w przegrodach zewnętrznych, ale również od liczby przegród wewnętrznych i ich szczelności, która może być opisana również za pomocą zależności (2). Chcąc więc przeprowadzić analizy przepływów powietrza należy m.in. zebrać informacje odnośnie do równań (2) dla wszystkich elementów przepuszczalnych dla powietrza. Możliwe jest to jedynie za pomocą badań infiltracji powietrza w budynkach [1, 2]. Umożliwiają one jednak tylko zestawienie wartości współczynników a i wykładników α , a nie pozwalają na ocenę intensywności przepływów powietrza i wartości związanych z nimi potrzeb cieplnych. Ze względu na pracochłonność pomiarów ocenę wykonuje się najczęściej za pomocą modeli matematycznych. Sprowadza się je zwy-



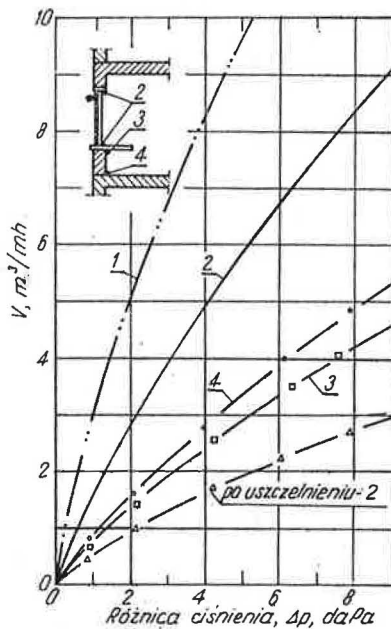
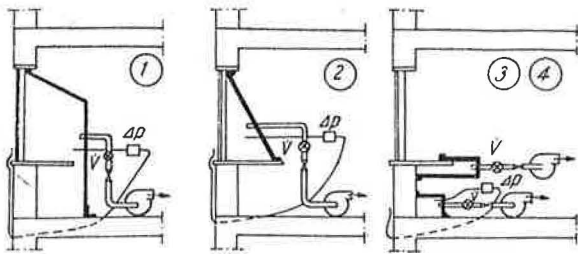
Rys. 1. Mechanizm kształtowania przepływów powietrza w budynkach

kle do bilansów ilości powietrza przepływającego przez budynki przy założeniu znajomości równań symulujących te przepływy [2, 3, 4, 5]. W wyniku obliczeń otrzymuje się ilości powietrza doprowadzane do pomieszczeń lub budynków V , albo dane odnośnie do wymiany powietrza n . Uwzględnienie zmian czynników zewnętrznych przy jednoczesnym założeniu warunków panujących wewnątrz pozwala na obliczenie potrzeb cieplnych wynikających z faktu napływu zimnego powietrza do pomieszczeń:



Rys. 2. Charakterystyka ruchu powietrza w szczelinach

*) Artykuł przygotowany na VIII Krajową Konferencję naukowo-techniczną „Wentylacja w budownictwie i przemyśle” 1985 r.



Rys. 3. Intensywność infiltracji powietrza przez wybrane elementy budowlane

$$\dot{Q} = f(V \text{ (lub } n), t_w, t_z(\tau), W(x, y, z, \tau), s, \psi, \varepsilon) W \quad (3)$$

gdzie:

t_w — założona temperatura powietrza zewnętrznego,

$t_z(\tau)$ — zmienna w czasie temperatura zewnętrzna,

$W(x, y, z, \tau)$ — prędkość wiatru, przy czym x, y, z , oznaczają położenie budynku w terenie, zaś τ — czas,

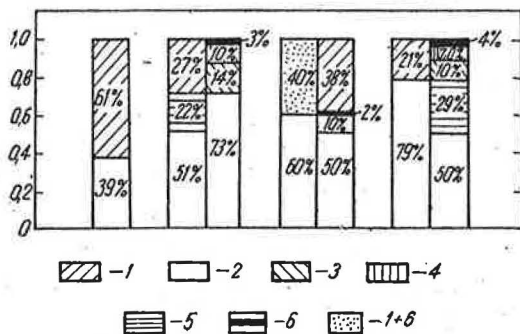
S — parametr określający konstrukcję budynku,

ψ — charakterystyka otworów i szczelin,

ε — parametr charakterystyczny dla rodzaju wentylacji.

Pełna realizacja modeli matematycznych odbywa się za pomocą maszyn cyfrowych, zaś szczegółowe obliczenia zależności (3) wymagają opracowania m.in. zmian klimatu zewnętrznego w postaci tzw. roku porównawczego [6].

W dalszej części zestawiono najistotniejsze wyniki pomiarów i analiz mających wpływ na omawiane zagadnienia.



Rys. 4. Udział infiltracji powietrza przez różne elementy budowlane w stosunku do całkowitej ilości powietrza przenikającego z zewnątrz

2. Przenikalność powietrzna przegród zewnętrznych

Pomiary procesów przenikania powietrza wykonano zarówno w budynkach istniejących, jak i w laboratorium [1, 2, 5, 6, 7]. Badania wykonano metodą ciśnieniową, obejmując nimi szczeliny w oknach, w miejscach ich osadzenia w płytach ściennych, w miejscach styku tych płyt zarówno w pionie, jak i poziomie. Część wyników przedstawiono na rysunku 3. Dla średnich różnic ciśnienia występujących na przegrodach zewnętrznych w trakcie badań (okres zimowy około 5 daPa) ilości powietrza przenikające przez pionowe przegrody zewnętrzne wynosiły około 10–18 m³/mh, z czego około 60% stanowiły ilości powietrza infiltrujące przez nieuszczelnienia w oknach i miejscach ich osadzenia w płytach. Pozostałość to powietrze przenikające przez styki płyt ściennych i stropowych. Ilustracją są dane przedstawione na rysunku 4 na przykładzie 4 pomieszczeń [6].

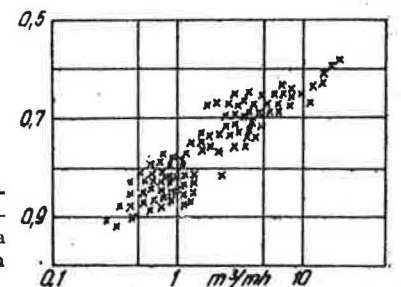
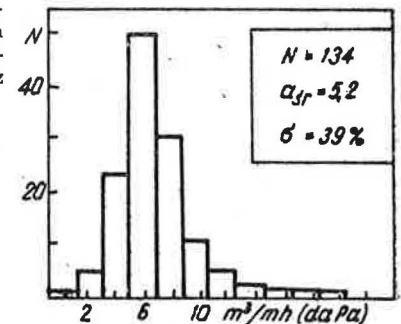
Z przebadanych 134 okien największa ich liczba charakteryzowała się współczynnikami przenikania powietrza równymi 5,2 m³/mh·daPa (rys. 5). Z innych elementów przepuszczalnych dla powietrza wymienić należy pionowe złącza płyt ściennych $a=0,5-0,2$ m³/mh, poziome złącza płyt ściennych i podłóg $a=0,5-5,0$ m³/mh (dla $\Delta p=1$ daPa).

W wyniku badań laboratoryjnych nie dało się uzyskać większej różnicy ciśnień. W obiektach oceniano zmiany wielkości wykładnika a . Okazało się, że wielkości te zależą nie tylko od różnicy ciśnień, ale również od wartości współczynników a (rys. 6). Wynoszą one średnio 0,5–0,8 zamiast przyjmowanych ogólnie wielkości 0,65–0,67 [1, 2, 6].

W zakresie średnich wartości współczynników przenikania powietrza dla okien takie zróżnicowanie wykładników a , powoduje przy korzystaniu z zależności (2) obliczenie ilości powietrza mniejszej od występującej w rzeczywistości o 20–30% [1].

Na podstawie pomiarów stwierdzić można, że całkowite ilości powietrza przenikającego w warunkach okresu zimo-

Rys. 5. Prawdopodobieństwo występowania współczynników przenikania powietrza przez badane okna

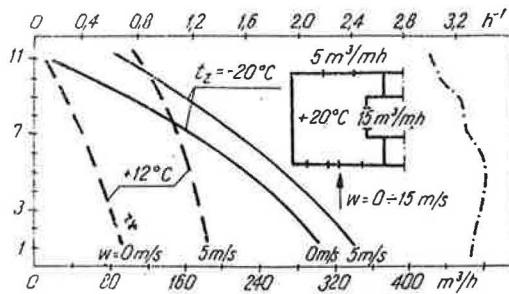


Rys. 6. Zależność wykładników a od współczynników przenikania powietrza dla badanych okien

wego do pomieszczeń wynoszą 2,5–6 m³/h w odniesieniu do 1 m² powierzchni przegród zewnętrznych. Jednostkowa ilość ciepła związana z przenikaniem powietrza waha się więc w granicach 1,5–2,4 W/m²·K przegród zewnętrznych [3, 6, 7, 8].

3. Wyniki obliczeń

Obliczenia wykonywano przy założeniu szerokiego zakresu zmian wszystkich czynników decydujących o przepływach powietrza i ciepła oraz różnych typów wentylacji. Dla budynków z ustaloną pomiarowo nieuszczelnnością przegród zewnętrznych i wentylacją grawitacyjną (rys. 7) charakterystyczne są duże zmiany zarówno ilości powietrza, jak i częstotliwości jego wymiany. Waha się ona w granicach 0,05–3 h⁻¹ (okres zimowy). Na rysunku 8 porównano ilości powietrza obliczone z równania (2) przy uwzględnieniu zmian wykładnika a zgodnie z wartościami zmierzonymi. Widoczna jest szczególnie duża różnica między tymi wartościami

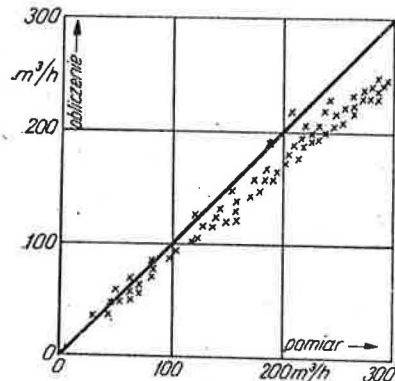


Rys. 7. Wymiana powietrza w 11-kondygnacyjnym budynku z wentylacją naturalną (grawitacyjną)

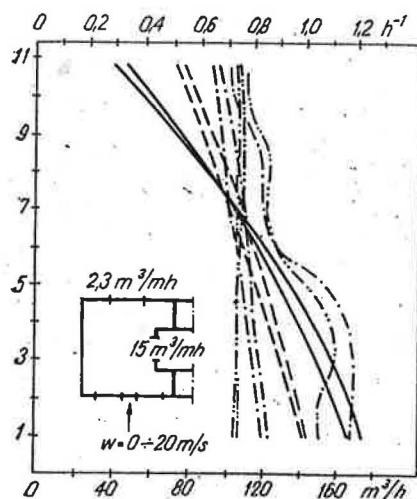
dla dużych ilości powietrza. Błąd ten powiększa się w przypadku pominięcia zmian wykładnika α i w warunkach różnicy ciśnień charakterystycznych dla obiektów z wentylacją grawitacyjną. Zmniejszenie wartości współczynników przenikania powietrza oraz zastosowanie wentylacji mechanicznej (rys. 9) wyrównuje zmiany ilości powietrza w pomieszczeniach oraz zmniejsza wymianę powietrza w całym budynku. Duża liczba obliczeń (około 400 wariantów) umożliwiła opracowanie wykresów, z których jeden przykładowo przedstawiono na rysunku 10. Widoczny jest duży wpływ procesów przenikania powietrza na sumaryczny bilans strat ciepła budynku z wentylacją grawitacyjną WN w porównaniu z obiektem z wentylacją mechaniczną MWV.

4. Podsumowanie i wnioski

Charakterystykę procesów przenikania powietrza przez przegrody budowlane można uzyskać w wyniku pomiarów wykonanych na elementach przepuszczalnych w warunkach ich eksploatacji. Umożliwia to wykonanie obliczeń przepływów powietrza z dokładnością wystarczającą do zastosowań praktycznych, a jednocześnie uniknąć czasochłonnych badań, często niemożliwych w przypadku użytkowania pomieszczeń. W wyniku pomiarów stwierdzono, że ilości powietrza przenikającego przez okna w istniejących budynkach (stanowiące ponad 50% całkowitej ilości powietrza infiltrującego



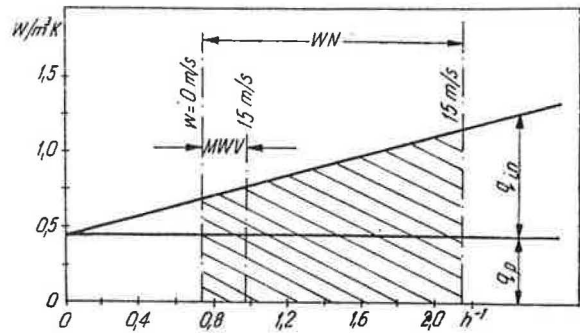
Rys. 8. Porównanie ilości powietrza infiltrującego uzyskanej z obliczeń ($\alpha = 0,67$) i pomiarów $\alpha = \alpha_n$



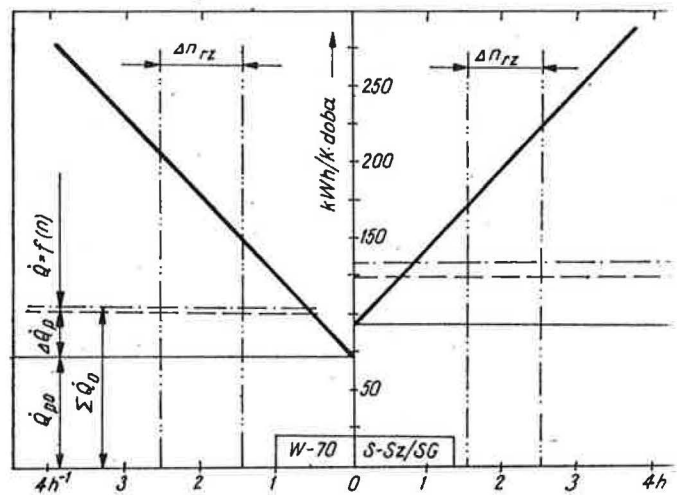
Rys. 9. Zmiany ilości powietrza infiltrującego do 11-kondygnacyjnego budynku z mechaniczną wentylacją wywiewną MWV

go do pomieszczeń) są kilkakrotnie wyższe niż wartości uzyskane w wyniku podobnych badań wykonywanych w innych krajach [1, 6, 7].

Pomijanie dużych nieszczelności występujących w miejscach osadzenia okien w płytach i na stykach płyt prowadzi już na etapie projektowania budynku do zaniżania jego rzeczywistych strat ciepła. Problem ten przedstawiono na s. 11 na przykładzie dwóch typów obiektów. Oblicz



Rys. 10. Porównanie potrzeb ciepłych związanych z przenikaniem powietrza q_p i infiltracją q_{in} w budynkach wielokondygnacyjnych



Rys. 11. Porównanie obliczeniowych ΣQ_0 i rzeczywistych potrzeb ciepłych ($Q_{po} + \Delta Q_p + Q = f(n)$) w dwóch budynkach mieszkaniowych ΔQ_p — dodatkowy wzrost strat ciepła wynikający ze zmniejszenia izolacyjności cieplnej przegród w stosunku do wartości projektowych

w projekcie technicznym straty ciepła wystarczają zaledwie na pokrycie potrzeb związanych z przenikaniem ciepła przez przegrody zewnętrzne.

W celu uwiarygodnienia obliczeń przepływów powietrza (a także potrzeb ciepłych) należałoby współczynniki przenikania powietrza dla okien zwiększyć o 30–50% obecnych dopuszczalnych wartości. W ten sposób uwzględniona została nieinfiltracja powietrza przez pozostałe elementy budowlane. Inną metodą obliczeń polega na założeniu stopnia nieszczelności wszystkich przegród zewnętrznych odniesione do sumy ich powierzchni. W tym przypadku współczynnik przenikania ciepła byłby wartością średnią z wartości współczynników α dla powierzchni wszystkich elementów przepuszczalnych dla powietrza [9].

Konsekwencje istnienia dużych nieszczelności w przegrodach zewnętrznych budynków są oczywiste. Powodują one przepływy zimnego powietrza, wymagającego w celu jego ogrzania w praktyce średnio 50% ilości ciepła dostarczanego do obiektów. Udziały te mają tendencję rosnącą w przypadku zwiększanych obecnie wymagań odnośnie do izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych.

PISMIENNICTWO

- [1] Nantka M.: Wpływ dokładności charakterystyk aerodynamicznych szczelności na uwiarygodność obliczeń wymiany powietrza w budynkach mieszkalnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej w druku

- [2] Nantka M.: *Tightness of Pre-fabricated Outer Walls and its influence on Heat Demand in Apartment Dwellings*. Air Infiltration Review 4/1983
- [3] Nantka M., Majerski S.: *A numerical method for air change rate of building calculated*. International Conference, Praga 1981
- [4] Nantka M., Majerski S.: *Skuteczność działania wentylacji w wielokondygnacyjnych budynkach mieszkalnych*. COW 6/1981
- [5] Nantka M.: *Air leakage values for windows and influence of air infiltration and ventilation heat flows in buildings*. Survey of current research. Edition A. J. C., Berkshire 1981
- [6] Nantka M.: *Theoretical and Experimental studies of Heat Flow due to Air Infiltration and Ventilation*. International Conference, Praga 1984
- [7] Nantka M.: *Ventilation and Air Infiltration Relation to the Indoor Air Quality and Energy Consumption of Typical Polish Buildings*. 3-rd International Conference, Stockholm 1984
- [8] Nantka M.: *Potrzeby cieplne budynków mieszkalnych i możliwości ich zmniejszenia*. COW 5/1982
- [9] Nantka M.: *Air flow in dwelling houses from energetic point of view*. World Congress on Heating, Ventilating and Air Conditioning. Clim 2000, Copenhagen 1985

STANISŁAW PRZYDRÓŻNY
MIROŚLAW SUCHODOLSKI

Politechnika Wroclawska I-13

Ograniczenie zapotrzebowania na energię do wentylacji zakładów piekarskich

Złożony cykl reakcji biochemicznych rozpoczyna dodanie do mąki wody i drobnoustrojów, wywołujących fermentację. Przemiany te kończące się w procesie wypieku, wykazują istotny wpływ na właściwości fizyczne ciast oraz na smak i aromat gotowego produktu.

Intensywność procesów fermentacyjnych spowodowanych obecnością enzymów mąki i różnorodnych drobnoustrojów rozwijających się w cieście zależy od wielu czynników. Najważniejszymi z nich są: biologiczny stan ziarna przed przemiałem, ilość drobnoustrojów występujących w cieście i ich aktywność oraz czas i temperatura trwania fermentacji. Ten ostatni czynnik decyduje o szybkości reakcji zachodzących w cieście. Okazuje się, że przy podwyższeniu temperatury z 25 do 30°C intensywność fermentacji wzrasta prawie dwukrotnie. Dlatego w ciastowniach piekarni trzeba zapewnić odpowiednie parametry mikroklimatu. Zgodnie z wytycznymi [5] wydanymi przez Ministerstwo Handlu Wewnętrznego i Usług w hali dzielenia i kształtowania ciasta oraz w hali produkcyjnej działu ciastkarskiego należy utrzymać w okresie zimowym temperaturę $t_p = 25^\circ\text{C}$, zaś w okresie letnim $t_p \leq 30^\circ\text{C}$. Jednocześnie wilgotność względna powietrza powinna wynosić 65-75%. Trzeba przy tym pamiętać, że w przypadku zastosowania automatycznych agregatów do wytwarzania i obróbki ciast wymienione parametry powietrza powinny istnieć tylko w wydzielonych częściach pomieszczenia, w których znajduje się ciasto. Niestety w praktyce zalecane parametry nie są utrzymywane. Spowodowane to jest błędnym doбором typu urządzenia wentylacyjnego, które nie jest w stanie zapewnić wymaganej wilgotności względnej powietrza. Problem ten został dokładnie przedstawiony w pracach [2, 3].

Czynniki decydujące o zapotrzebowaniu na energię do wentylacji.

Jak wiadomo, podstawową zasadą projektowania urządzeń wentylacyjnych jest dążenie do stosowania rozwiązań optymalnych z punktu widzenia zadań przed nimi stawianych, a jednocześnie prostych pod względem konstrukcyjnym, pewnych w działaniu oraz energo- i materiałoszczędnych.

Na nakłady inwestycyjne urządzeń wentylacyjnych wpływa przede wszystkim rodzaj oraz wielkość urządzenia, która determinowana jest strumieniem objętości powietrza wentylującego.

Na ekonomiczną pracę urządzeń wpływają w decydujący sposób koszty energetyczne związane z ogrzewaniem powietrza oraz jego transportem.

Ograniczenie zużycia energii przez urządzenia wentylacyjne musi być rozpartywane w trzech etapach: projektowania, budowy i eksploatacji.

W trakcie projektowania należy wziąć pod uwagę wiele czynników, m.in.:

1. Ograniczenie do niezbędnego minimum strumienia powietrza wentylującego. Strumień ten określany jest przez

obciążenie cieplne pomieszczenia lub ilość szkodliwych substancji wydzielających się w trakcie procesu technologicznego.

Dlatego należy zawsze dążyć do ograniczenia poszczególnych pozycji bilansu cieplnego zdając sobie sprawę, że na niektóre z nich można mieć duży wpływ i to właśnie na etapie projektowania. Takie możliwości projektant powinien bezwzględnie wykorzystywać.

Ponadto na strumień objętości powietrza wentylującego ma również wpływ przyjęta różnica między temperaturą powietrza usuwanego a temperaturą powietrza nawiewanego.

2. Zastosowanie właściwej organizacji wymiany powietrza. Przy rozwiązywaniu tego czynnika musi być spełniona zasada, aby strefa przebywania ludzi była stale omywana przez powietrze wentylujące.

Powietrze to powinno być usunięte z pomieszczenia dopiero po zaasymilowaniu szkodliwych substancji lub obciążenia cieplnego.

Prawidłowa organizacja wymiany powietrza decyduje przede wszystkim o wykorzystaniu powietrza wentylującego.

3. Racjonalne projektowanie sieci przewodów powietrznych. W niektórych instalacjach wentylacyjnych zapotrzebowanie na energię do transportu powietrza wentylującego w stosunku do zapotrzebowania na energię do jego ogrzewania w bilansie rocznym wynosi 50% a nawet więcej. Biorąc to pod uwagę należy dążyć do ograniczenia strat ciśnienia w sieciach nawiewnych i wywiewnych.

Można to osiągnąć między innymi przez dobór racjonalnych prędkości przepływu powietrza w przewodach wentylacyjnych. Należy przestrzegać zasady, by przy trójmianowej pracy urządzeń wentylacyjnych stosować dolne granice prędkości przepływu powietrza w przewodach zaś przy użytkowaniu krótkotrwałym tych urządzeń w ciągu doby, np. kilka godzin, przewidywać większe prędkości przepływu powietrza.

4. Odzyskiwanie energii cieplnej zawartej w powietrzu wyrzuconym do atmosfery. Energię z powietrza usuwanego można w urządzeniach wentylacyjnych wykorzystywać w sposób dwojaki.

Jak wiadomo najprostszym sposobem wykorzystania energii zawartej w strumieniu powietrza usuwanego jest stosowanie obiegu powietrza, czyli mieszanie części powietrza usuwanego z powietrzem zewnętrznym i dostarczanie tej mieszaniny powietrza do pomieszczenia wentylowanego. Innym sposobem wykorzystania energii zawartej w powietrzu usuwanym z pomieszczenia jest odzyskiwanie ciepła z tego strumienia powietrza.

Od kilkunastu lat w krajach Europy Zachodniej stosowanie odzyskiwanego ciepła jest rzeczą nieodzowną w urządzeniach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych.

W kraju nie stosuje się odzyskiwania ciepła z powietrza usuwanego do atmosfery z powodu braku odpowiednich wymienników ciepła.

5. Stosowanie automatycznej regulacji urządzeń wentylacyjnych. Niestosowanie w kraju automatycznej regulacji urządzeń wentylacyjnych powoduje znaczne straty ciepła.