

**Elżbieta MIŚNIAKIEWICZ**

Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach  
elzbieta.misniakiewicz@gmail.com

## **SYMULACJE WYMIANY POWIETRZA, JAKO POMOC W PROJEKTOWANIU ORGANIZACJI NAPŁYWU POWIETRZA DO MIESZKAŃ**

### STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono podstawowe zależności opisujące zasadę działania systemu wentylacji naturalnej. Przedstawiono również wyniki symulacji wymiany powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych wyposażonych w wentylację naturalną. Symulacje przeprowadzono autorską procedurą obliczeniową. Na podstawie analizy przeprowadzonych symulacji, zaproponowano wprowadzenie zróżnicowania stolarki okiennej, np. w odniesieniu do kondygnacji, dla utrzymania akceptowalnej jakości powietrza wewnętrznego w sezonie grzewczym. Przedstawiona propozycja zróżnicowania stolarki okiennej pod względem napływu powietrza do pomieszczeń kierowana jest głównie do projektantów architektury.

### SŁOWA KLUCZOWE

wymiana powietrza, projektowanie architektoniczne, szczelność stolarki, symulacje komputerowe, model wielostrefowy

### WPROWADZENIE

Obowiązujące przepisy techniczno-budowlane dotyczące współczynnika infiltracji powietrza stolarki budowlanej, mają na celu ograniczanie strat ciepła związanych z nieszczelnością stolarki. Wymiana powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych powinna spełniać warunki normowe minimalnej krotności  $n_{min} = 0,5 \text{ h}^{-1}$  (pokoje) wymaganej ze względów higienicznych i przyjmowanej do obliczeń projektowego obciążenia cieplnego [N1]. Niestety, przez znaczną część sezonu ogrzewczego nie ma zapewnionego, w większości przypadków, doprowadzenia minimalnego strumienia powietrza wentylacyjnego [9].

Przy nadal stosowanej - taniej i popularnej wentylacji grawitacyjnej - proponuje się możliwość wprowadzenia zróżnicowania stolarki okiennej wyposażającej obiekt, pod względem napływu powietrza do pomieszczeń (co przedstawiono w niniejszym artykule).

Prowadzenie prac projektowych, zmierzających do uzyskania architektury sprzyjającej człowiekowi - architektury zrównoważonej, powinno obejmować w swoim zakresie kształtowanie prawidłowych, najlepiej - komfortowych warunków klimatu wewnętrznego. Stan ten w głównej mierze kreować można dzięki prawidłowej organizacji wymiany powietrza. Celem projektanta jest uzyskanie, w jak najwyższym stopniu zrównoważenia aspektów: architektonicznego, środowiskowego oraz rynkowego. W ostatnich latach priorytetową przesłanką jest minimalizacja strat energii cieplnej - stąd architekt odpowiednio

kształtuje bryłę budynku i usytuowanie jej względem stron świata oraz w terenie, uwzględniając między innymi wpływ wiatru na straty ciepła przez budynek. Straty te zależą w znacznej mierze od ilości wymian powietrza zewnętrznego, wynikających z możliwości i ograniczeń jego napływu do pomieszczeń.

### 1. Podstawowe zależności, opisujące zasadę działania systemu wentylacji naturalnej grawitacyjnej, dla którego przeprowadzono symulacje wymiany powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych

Procesy przenikania powietrza przez przegrody i ich elementy opisywane są powszechnie znaną charakterystyką przepływową - równaniem przepływu (1.1):

$$V = S (\Delta p)^\alpha, [m^3/s \text{ (m}^3/h)] \quad (1.1)$$

gdzie:

$S$  - szczelność (współczynnik przepływu), [ $m^3/s \cdot Pa^\alpha$  lub:  $m^3/h \cdot daPa^\alpha$ ],

$\Delta p$  - różnica ciśnień występująca po obu stronach przegrody (rozpatrywanej nieszczelności), [Pa lub: daPa],

$\alpha$  - wykładnik potęgowy, uzależniony od rodzaju przepływu (ruchu powietrza) w szczelinach, ich wymiarów oraz oporów tarcia; zmieniający się w zakresie wartości od 0,5 (ruch burzliwy) do 1,0 (ruch laminarny).

Szczelność dla stolarki budowlanej (okno, drzwi), wyrażana jest zależnością (1.2):

$$S = a_L \sum l \quad (1.2)$$

gdzie:

$a_L$  - współczynnik przenikania powietrza, odniesiony do długości szczelin, [ $dm^3/m \cdot s \cdot Pa^\alpha$ ,  $m^3/m \cdot s \cdot Pa^\alpha$  lub:  $m^3/m \cdot h \cdot daPa^\alpha$ ],

$\sum l$  - sumaryczna długość szczelin, liczona wzdłuż części otwieralnych, [m].

Wartości wykładnika potęgowego  $\alpha$ , powszechnie przyjmowane są (na podstawie badań empirycznych, przeprowadzanych przez wielu badaczy), w zależności od wartości współczynnika przenikania powietrza, następująco:

- wykładnik potęgowy  $\alpha$ , ma tendencje do zwiększania się w miarę spadku różnicy ciśnień wymuszających przepływ powietrza oraz zwiększania się wymiarów szczelin, tzn. głównie ich wysokości i głębokości; dla prostych konstrukcji szczelin (np. wzdłuż wewnętrznych drzwi lub w porowatym materiale budowlanym) wielkość wykładnika może przekraczać 0,85, a w przypadku szczelin typowych dla stolarki okiennej w stanie rozszczelnienia - wielkość wykładnika waha się w granicach  $0,60 \div 0,67$ ;

- wzrost różnicy ciśnień lub zwiększenie się oporów przepływu powietrza przez konstrukcję szczelin na skutek pojawienia się w nich dużej ilości załamania (np. styki krawędzi otwieralnych skrzydeł okien o dużej szczelności, z ościeżnicą), powoduje zwiększenie się udziału ruchu turbulentnego i w konsekwencji zmniejszenie wielkości współczynnika  $\alpha$  - do wartości poniżej 0,65;

- przy przepływach powietrza przez otwory w przegrodach lub przez kanały wentylacyjne stosuje się z reguły tą samą zależność jak dla szczelin, przy czym wobec występowania w tym przypadku ruchu turbulentnego, przyjmowana jest wielkość wykładnika  $\alpha = 0,5$ ; dla przepływów przez kanał grawitacyjny zdecydowanie niższych od wymaganych normatywnymi ilościami powietrza, mogą wystąpić odstępstwa.

Dla kanału wentylacyjnego przyjęto (powszechnie stosowaną), charakterystykę przepływową opisaną kwadratową zależnością strat ciśnienia ( $\Delta p$ ) w kanałach, od objętościowego przepływu powietrza ( $V$ ), przyjmującą (w przypadku, gdy odpowiada ona wartościom normatywnym przepływu), postać (1.3):

$$\Delta p = r \cdot V^2, [Pa \text{ lub: daPa}] \quad (1.3)$$

gdzie:

$r$  - współczynnik oporów liniowych i miejscowych (nazywany również opornością właściwą) i przyjmujący dla danego rozwiązania kanału wartość stałą- najczęściej opisywaną zależnością (1.4):

$$r = \lambda \frac{l}{d_z} + \sum \zeta \quad (1.4)$$

gdzie:

$\lambda$  - współczynnik oporów liniowych, zależny od burzliwości przepływu powietrza (liczby Re) i chropowatości względnej ( $e$ ) wewnętrznej ścianki kanału,

$l$  - długość rozpatrywanego odcinka kanału o średnicy zastępczej  $d_z$  [m],

$\zeta$  - bezwymiarowe współczynniki oporów miejscowych, występujących na powierzchni kanału.

Zależność (1.4), może być zmieniona na postać podobną do równania opisującego przenikanie powietrza przez szczeliny, czyli na równanie (1.1), a więc zapisać można ją w postaci (1.5):

$$V = S (\Delta p)^\alpha \rightarrow V_k = A_k (\Delta p_k)^\alpha, \quad [m^3/s \text{ (m}^3/h)] \quad (1.5)$$

gdzie:

$A_k$  - współczynnik przepływu powietrza dla konkretnego kanału wentylacyjnego, przy czym występuje zależność (1.6):

$$A_k = \frac{1}{\sqrt{r}}, \quad [m^3/s \cdot Pa^\alpha \text{ lub: } m^3/h \cdot daPa^\alpha] \quad (1.6)$$

Wartości różnic ciśnień, kształtujących się w obrębie kanału są zależne od zmienności naturalnych sił napędowych, tj. wyczerpu termicznego i naporu wiatru. Siła ciągu uzależniona jest od odległości w pionie między kratką wentylacyjną (miejszem napływu powietrza do kanału, w przypadku prawidłowego ciągu), a wylotem powietrza z przewodu (ponad dachem). Pod wpływem tej różnicy ciśnienia, powietrze zewnętrzne dostaje się do pomieszczeń przez otwory nawiewne w stolarce okiennej (nawiewniki, nieszczelności wzdłuż przemyku skrzydeł okiennych).

Ciśnienie czynne - różnicę ciśnienia powstającą wskutek różnicy wysokości (pomiędzy miejscem napływu i wypływu) i gęstości powietrza (w zależności od temperatury) można opisać wzorem (1.7):

$$\Delta p_k = h_g \cdot g (\rho_e - \rho_i), \quad [Pa] \quad (1.7)$$

gdzie:

$\Delta p_k$  - różnica ciśnienia, [Pa],

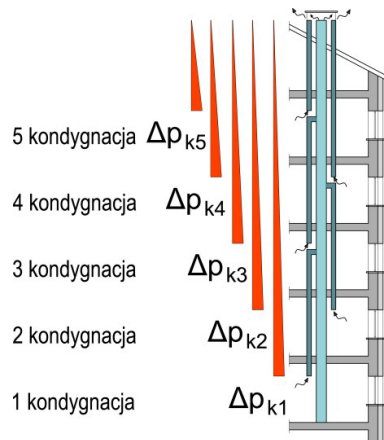
$h_g$  - wysokość kanału w pionie (rys. 2), między wlotem do kanału (otwór z kratką wlotową), a wylotem z przewodu wentylacyjnego ponad dachem ( $h_k$ ) wraz z odległością od linii zerowego ciśnienia czynnego (leżącą w połowie wysokości nawiewnika ( $\Delta h_n$ ) bądź w połowie wysokości okna ( $\Delta h_o$ )- jeśli napływ jest realizowany przez szczeliny przemyków okiennych), [m],

$g$  - przyspieszenie ziemskie, [m/s<sup>2</sup>],

$\rho_e$  - gęstość powietrza zewnętrznego, [kg/m<sup>3</sup>],

$\rho_i$  - gęstość powietrza wewnętrznego, [kg/m<sup>3</sup>].

Różnica ciśnienia ( $\Delta p_{ky}$ , tzw. siła ciągu - zgodnie z zależnością (1.7) - jest wprost proporcjonalna do wysokości kanału wentylacyjnego (rys. 1).



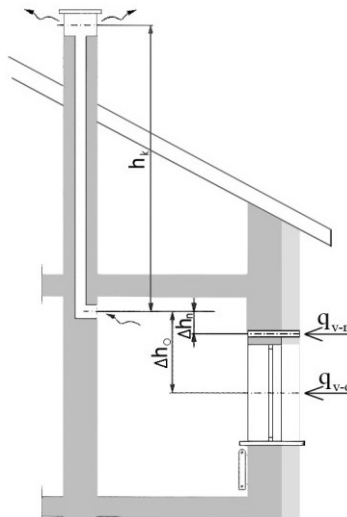
Rys 1. Zależność wartości różnicy ciśnienia w kanale wentylacyjnym od jego wysokości (w symulacjach przyjęto wyposażenie mieszkania w kanały zbiorcze)

Fig 1. Value dependence of differential pressure in ventilation duct related to its height (in simulations was established apartment equipment with duct summary).

Źródło: opracowanie własne

Projektowanie przewodów kominowych, opiera się na warunku zrównania ciśnienia czynnego, ze stratami wywołanymi przepływem powietrza przez przewód wywiewny (rys. 2). Płaszczyznę wyrównania ciśnienia określa się w zależności od rodzaju napływu powietrza:

- w osi okna (przy braku nawiewników),  $h_g = h_k + \Delta h_o'$ ;
- w osi nawiewnika (w razie jego obecności),  $h_g = h_k + \Delta h_n$ .



Rys 2. Określanie położenia płaszczyzny wyrównania ciśnienia (linii zerowego ciśnienia czynnego) dla przewodów wentylacji grawitacyjnej

Fig 2. Identification of plane alignment pressure position (line of zero active pressure) for gravity ventilation duct

Źródło: opracowanie własne

Przez kanał wentylacji grawitacyjnej przepływa strumień objętości powietrza (odpowiedni, np. przewidziany normą), jeśli strata ciśnienia w przewodzie wentylacyjnym ( $\Delta p$ ) będzie mniejsza lub równa ciśnieniu czynnemu ( $\Delta p_k$ ) rozpatrywanego układu (1.8):

$$\Delta p \leq \Delta p_k \text{ [Pa]} \tag{1.8}$$

## 2. Ogólna charakterystyka modelu obliczeniowego i procedury numerycznej wykorzystanej do analiz wymiany powietrza w pomieszczeniach

Symulacje wymiany powietrza przeprowadzono autorską procedurą numeryczną „AIR-3”. Procedura umożliwia wykonanie analiz przepływów i wymiany powietrza w mieszkaniach wyposażonych w wentylację naturalną grawitacyjną [4,5]. Na podstawie uzyskanych danych, można następnie przeprowadzić ocenę stopnia zanieczyszczeń powietrza zarówno w budynku jak i w przestrzeniach w nim zlokalizowanych. Opracowana przez autora artykułu, procedura numeryczna „AIR-3” bazuje na modelu matematycznym odwzorowującym rzeczywisty podział wewnętrznej przestrzeni budynków - ścian działowych mieszkań. Każde z pomieszczeń wewnętrznych objęte jest bilansowaniem przepływających przez nie strumieni powietrza (model wielostrefowy). Możliwym jest wprowadzenie do analiz przypadków otwierania okien i drzwi w obrębie badanych mieszkań.

Bilans powietrza w obrębie mieszkania ma postać (2.1):

$$q_{v-o(P)} = q_{v-KW(P)} \quad (2.1)$$

gdzie:

$q_{v-o(P)}$  - strumień objętości powietrza napływający do pomieszczeń z oknami, drzwiami balkonowymi: P1(kuchnia), P2, P5, P6 (pokoje);

$q_{v-KW(P)}$  - strumień objętości powietrza usuwanego kanałami wywiewnymi pomieszczeń: P1 (kuchnia), P3 (łazienka), P4 (ubikacja).

Przy założeniu zgodnych z wymaganiami kierunków przepływu powietrza, strumienie doprowadzane do pomieszczeń wynoszą:

- przez okna zamknięte (przenikanie powietrza przez nieszczelności), wg zależności (2.2):

$$q_{(v-o P)} = C_{o(P)} (| p_{e(P) x, y, z} - X_{i(P)} |)^{n_{o(P)}} \text{sign} (\Delta p) \quad (2.2)$$

przy czym:

$$C_{o(P)} = a_{o(P)} \sum l_{o(P)} \quad (2.3)$$

gdzie:

$C_{o(P)}$  - współczynnik przepływu nieszczelności;

$a_{o(P)}$  - współczynnik infiltracji powietrza okna, drzwi balkonowych w danym pomieszczeniu: P1, P2, P5, P6;

$l_{o(P)}$  - długość szczelin okna, drzwi balkonowych w danym pomieszczeniu: P1, P2, P5, P6;

$p_{e(P) x, y, z}$  - ciśnienie na zewnątrz danego pomieszczenia: P1, P2, P5, P6 (x, y oraz z - współrzędne lokalizacji stolarki w obrębie budynku);

$X_{i(P)}$  - ciśnienie wewnątrz danego pomieszczenia P1, P2, P5, P6;

$n_{o(P)}$  - wykładnik przepływu powietrza okna, drzwi balkonowych ( $n = 0,65 \div 0,67$ ) danego pomieszczenia P1, P2, P5, P6;

$\text{sign} (\Delta p)$  - znak wskazuje kierunek przepływu.

- przez okna otwarte (przepływ powietrza przez powierzchnię), wg zależności (2.4):

$$q_{v-KW(P)} = C_{KW(P)} (| X_{i(P1,3,4)} - p_{e,wyw} |)^{0,5} \text{sign} (\Delta p) \quad (2.4)$$

gdzie:

$A_{o(P)}$  - powierzchnia uchylonych okien, drzwi balkonowych danego pomieszczenia: P1, P2, P5, P6.

Strumienie powietrza usuwanego kanałami wywiewnymi wynoszą (2.5):

$$q_{v-KW(P)} = C_{KW(P)} (|X_{i(P1,2,3)} - p_{e,wyl}|)^{0.5} \text{sign}(\Delta p) \quad (2.5)$$

gdzie:

$C_{KW(P)}$  - współczynnik przepływu kanału wentylacyjnego danego pomieszczenia: P1, P3, P4;  
 $X_{i(P1,2,3)}$  - ciśnienie wewnątrz danego pomieszczenia z kanałem wentylacyjnym: P1, P3, P4;  
 $p_{e,wyl}$  - ciśnienie zewnętrzne w miejscu wylotu kanału wentylacyjnego danego pomieszczenia: P1, P3, P4.

Równanie bilansowe dla przykładowego pomieszczenia (P1-kuchnia) ma następującą postać (2.6):

$$q_{v-o(P1)} + q_{v-dw(P7 \rightarrow P1)} = q_{v-KW(P1)} \quad (2.6)$$

gdzie:

$q_{v-o(P1)}$  - strumień powietrza napływającego przez okno do pomieszczenia P1;

$q_{v-dw(P7 \rightarrow P1)}$  - strumień powietrza przepływającego przez drzwi z pomieszczenia P7 (przedpokój) do pomieszczenia P1;

$q_{v-KW(P1)}$  - strumień powietrza przepływającego kanałem wentylacyjnym pomieszczenia P1.

Przedstawione równania posłużyły do opracowania procedury komputerowej „AIR-3” przy zastosowaniu metody *Newtona – Raphsona* linearyzacji układu równań nieliniowych korzystając z zależności (2.7):

$$J(p_n) \cdot (p_n - p_{n+1}) = f(p_n) \quad (2.7)$$

Proces obliczeniowy rozpoczyna się każdorazowo od etapu wczytywania wprowadzonych parametrów budynku (usytuowanie w terenie, wymiary główne, ilość kondygnacji, ich wysokość, itp.), współrzędnych lokalizacji rozpatrywanego mieszkania, charakterystyk przenikania lub przepływu powietrza dla wyróżnionych elementów (szczeliny w stolarze budowlanej, otwory, kanały wentylacyjne, stopień otwarcia okien, drzwi itp.) oraz danych opisujących stan sił napędowych procesu (temperatury wewnętrzne i zewnętrzne, kierunki i prędkości wiatru, itp.).

Ponieważ wiatr jest oprócz temperatur zewnętrznych drugim z czynników klimatycznych decydującym o kształtowaniu się na przegrodach zewnętrznych ciśnień, wzmagających lub osłabiających procesy wymiany powietrza w pomieszczeniach i budynkach, uwzględniono siły naporu wiatru (przy ustalonej jego średniej prędkości i przeważającym kierunku na przestrzeni przyjętego odcinka czasu).

Oddziaływanie wiatru wytwarza na przegrodach zewnętrznych określone ciśnienie statyczne (zmieniające wartość różnicy ciśnień, a tym samym ilość powietrza przenikającego przez nieszczelności lub otwory), zależne od prędkości wiatru oraz od położenia punktu na przegrodzie budynku. Ciśnienie to opisywane jest powszechnie stosowaną zależnością (2.8):

$$p_{e(w)x,y,z} = 0,5 c_k p_e (w_h^2)_{x,y,z} \quad [\text{Pa}] \quad (2.8)$$

gdzie:

$p_e$  - gęstość powietrza zewnętrznego, [kg/m<sup>3</sup>],

$w_h$  - prędkość wiatru na wysokości „h” ponad poziomem gruntu,

$x, y, z$  - współrzędne określające położenie rozpatrywanego punktu na przegrodach budynku,

$c_k$  - współczynnik konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru (bezwymiarowy współczynnik aerodynamiczny), określający jaką część energii kinetycznej wiatru zostaje zamieniona na ciśnienie statyczne w danym punkcie na przegrodzie budynku.

Do określenia prędkości wiatru ( $w_h$ ) na wysokości ( $h$ ) nad poziomem gruntu, w procesie

obliczeniowym przedstawianego programu symulacyjnego wykorzystano (podaną np. w [10]) poniższą zależność (2.9):

$$w_h = \delta \cdot w_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\beta, \text{ [m/s]} \quad (2.9)$$

gdzie:

$w_0$  – prędkość wiatru na poziomie odniesienia (zazwyczaj około 10 m - poziom pomiaru prędkości w stacjach meteorologicznych),  
współczynnik  $\delta$  i wykładnik  $\beta$  - określają w sposób ogólny rodzaj terenu (klasy I-V) oraz jego zabudowę.

Współczynnik konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru określany jest w badaniach eksperymentalnych (na przykład - [1, 2, 3, 11]), przeprowadzanych w tunelach aerodynamicznych, dla zadanego usytuowania obiektu w terenie.

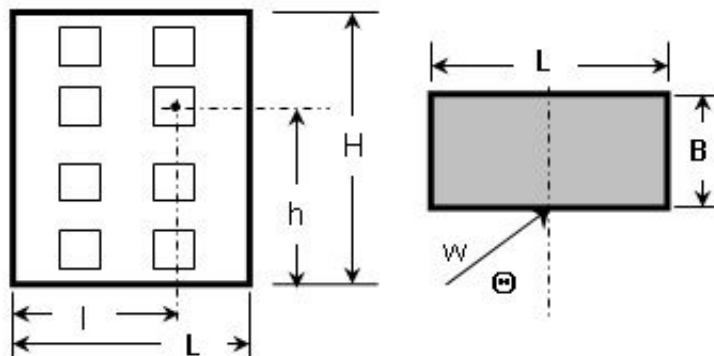
W opracowanym programie symulacyjnym „AIR-3”, wpływ wiatru na budynek uwzględniono wykorzystując zależność funkcyjną (2.10) wielkości współczynnika konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru ( $c_e$ ) - od geometrii budynku, kąta działania wiatru i współrzędnych określających położenie okna na przegrodzie. Zależność (2.10) zdefiniowano i potwierdzono eksperymentalnie [11], przy uzyskaniu wyników pomiarów (ponad 5 tysięcy) różnych modeli w tunelach aerodynamicznych. Dla założeń przedstawionych na rys. nr 3 (opracowanym zgodnie z oznaczeniami w [11, 12]), zależność (2.10) ma następującą postać:

$$\begin{aligned} c_e = & \varphi_0 + (\varphi_1 \cdot Ar) + (\varphi_2 \cdot \cos(2\theta)) + (\varphi_3 \cdot z \cdot \sin \theta \cdot R^{0,169}) + (\varphi_4 \cdot \cos(2\theta) \cdot R^{0,279}) + (\varphi_5 \cdot \sin(2\theta)) + \\ & + (\varphi_6 \cdot z \cdot \cos \theta) + (\varphi_7 \cdot \cos(x_r)) + (\varphi_8 \cdot \cos(x_r, \theta)) + (\varphi_9 \cdot \cos(x_r, \theta) \cdot R^{0,245}) + (\varphi_{10} \cdot z \cdot \sin \theta) + \\ & + (\varphi_{11} \cdot x_r \cdot \sin \theta) + (\varphi_{12} \cdot x) + (\varphi_{13} \cdot \cos(x_r) \cdot R^{0,85}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

gdzie:

$\varphi_1$ -  $\varphi_{13}$  - współczynniki regresji nieliniowej zestawione w pracy [12], w zależności od wysokości budynku,

$\theta$  - kąt napływu wiatru.



Rys 3. Schemat budynku z zaznaczeniem sposobu określania współrzędnych lokalizacji okien [4]:

$x = l/L$ ;  $x_r = (x-0,5)/0,5$ ;  $L/B = R$ ;  $z = h/H$ ;  $Ar = \theta \cdot 3,1415/180$

Fig 3. Building scheme plane with windows position [4]:

$x = l/L$ ;  $x_r = (x-0,5)/0,5$ ;  $L/B = R$ ;  $z = h/H$ ;  $Ar = \theta \cdot 3,1415/180$

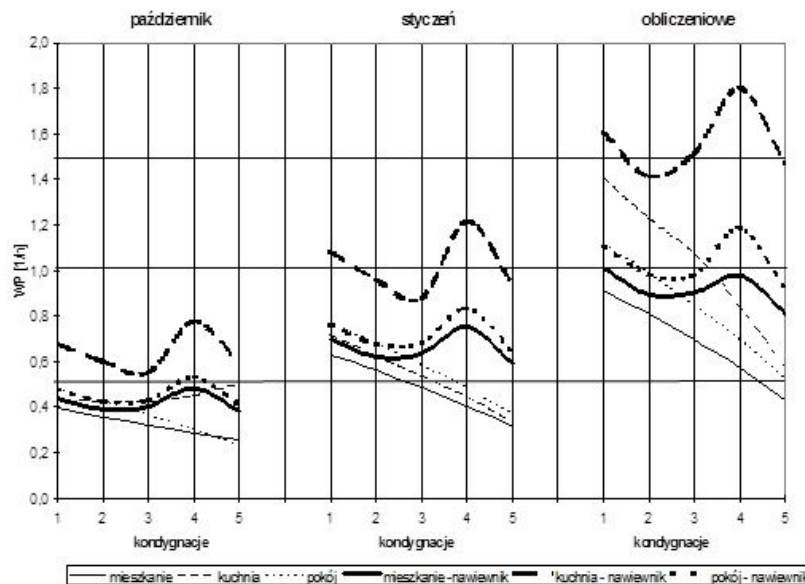
Źródło: opracowanie własne

### 3. Wyniki symulacji wymiany powietrza dla mieszkania sytuowanego na różnych kondygnacjach

Poniżej, przedstawiono wyniki przeprowadzonych symulacji wymiany powietrza dla mieszkania o powierzchni 64 m<sup>2</sup> (3 pokoje, kuchnia, łazienka, WC, przedpokój).



Obliczone zostały strumienie powietrza dla mieszkania usytuowanego na poszczególnych poziomach 5-cio kondygnacyjnego budynku (wybrane wyniki symulacji przedstawiono na rys. nr 4). Przedstawione symulacje odnoszą się do mieszkania usytuowanego w tym samym pionie budynku, dla którego również wykonano badania jakości środowiska wewnętrznego (wyniki pomiarów podano w [6]).



Rys 4. Porównanie ilości wymian powietrza dla mieszkania, kuchni i pokoju dziennego w budynku 5-cio kondygnacyjnym (linie cienkie - I wersja, linie grube - II wersja), dla warunków zewnętrznych października, stycznia i dla temperatur projektowych (obliczeniowych) [7]

Fig 4. Comparison of air exchanges in flats, a kitchen and a lounge in 5-storey building (thin line- I version, thick line- II version) [7]

Źródło: opracowanie własne

Symulacje przeprowadzone zostały przy przyjęciu (dla usytuowania budynku w konkretnej miejscowości):

- temperatury zewnętrznej projektowej,
- uśrednionych warunków klimatycznych (temperatura, prędkość wiatru) dla października (okres przejściowy w ogrzewnictwie),
- uśrednionych warunków klimatycznych (temperatura, prędkość wiatru) dla stycznia (najchłodniejszego miesiąca sezonu grzewczego).

Przyjęto przy tym, następujące warunki użytkowania mieszkania: drzwi do mieszkania - zamknięte (szczelne), drzwi do pokoju - otwarte, okna i drzwi balkonowe - zamknięte. Wykonano dwie wersje symulacji (I wersję oraz II wersję) - zróżnicowane zadanymi wartościami współczynnika  $a$  stolarki okiennej budynku.

W I-szej wersji przyjęto dla wszystkich pomieszczeń każdej kondygnacji budynku, współczynnik stolarki okiennej taki sam:  $a = 1,0 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3})$ ; występujące ilości wymian powietrza dla mieszkania, pokoju dziennego oraz kuchni przedstawiono na rys. nr 3. Przyjętą wartość współczynnika  $a$  można uznać, jako użytkowanie szczelnej stolarki okiennej o współczynniku przenikania powietrza  $a = 0,3 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3})$ , w funkcji maksymalnego mikrouchylenia.

W II-giej wersji wprowadzanych danych symulacyjnych, zróżnicowano szczelność stolarki okiennej w odniesieniu do górnych kondygnacji budynku. Dla pomieszczeń kuchennych przyjęto stolarkę okienną o współczynniku  $a = 0,3 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3})$  z zamontowanym nawiewnikiem ( $a_{min.} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ , dla różnicy ciśnienia 1 daPa), przy czym



na ostatnich dwóch kondygnacjach przyjęto okno kuchenne z dwoma nawiewnikami. Dla pozostałych okien, w pomieszczeniach na kondygnacjach 1. ÷ 2, narzucono współczynnik  $a = 1,0 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3})$ - zakładając rozszczelnienie większości skrzydeł okiennych stolarki o współczynniku  $a = 0,3 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3})$ , przyjęte według Warunków Technicznych z 2008 roku, zgodnych z Rozporządzeniem [R1]. Począwszy od kondygnacji 3-ciej, zwiększono długość szczeliny stolarki okiennej wprowadzając dodatkowy podział okna (drugi słupek). Dla dwóch ostatnich kondygnacji budynku przyjęto stolarkę okienną o współczynniku  $a = 0,3 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3})$  z nawiewnikiem ( $a_{\text{min.}} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ , dla różnicy ciśnienia 1 daPa), przy czym dla pokoju dziennego przyjęto dwa nawiewniki.

Wprowadzenie powyższego zróżnicowania rodzaju stolarki okiennej (II wersja) pod względem szczelności na przepływ powietrza - w odniesieniu do kondygnacji budynków - pozwala na utrzymanie wymian powietrza w mieszkaniach górnych kondygnacji na poziomie  $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$  w przeważającej części sezonu grzewczego.

Otrzymanie w mieszkaniach wymian powietrza nawet na tak niskim poziomie, nie jest możliwe przy przyjęciu dla wszystkich kondygnacji (I wersja) stolarki o współczynniku infiltracji  $a = 1,0 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3})$ . Sytuacja taka jest zbliżona również dla stanu wyposażenia budynku w stolarkę o współczynniku infiltracji  $a = 0,3 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3})$ , przy zwiększeniu doprowadzenia powietrza przez wykorzystanie systemu rozszczelniania okien.

#### 4. Propozycja organizacji wymiany powietrza w budynkach mieszkalnych wyposażonych w wentylację grawitacyjną

Proponuje się, na etapie projektowania nowo realizowanego obiektu wyposażanego w wentylację grawitacyjną, lub przy przeprowadzanej modernizacji takich budynków, rozpatrzenie możliwości zróżnicowania szczelności stolarki okiennej w budynku. Zróżnicowanie ilości napływającego powietrza do pomieszczeń może być przeprowadzone w zależności od:

- funkcji pomieszczeń i występujących w nich nadmiernych obciążeń i zanieczyszczeń (np. pary wodnej,  $\text{CO}_2$ ) zagrażających zdrowiu, a nawet życiu użytkowników (np. CO);
- kondygnacji budynku, na której usytuowane jest mieszkanie i wynikającej stąd długości przewodu wentylacji grawitacyjnej;
- usytuowania stolarki okiennej pomieszczenia, w odniesieniu do przeważającego kierunku wiatru w okresie zimowym.

Wprowadzenie dodatkowej długości szczeliny stolarki, posiadającej funkcję rozszczelniania, do uzyskania nawet tylko wartości współczynnika infiltracji  $a = 1,0 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3})$ , zapewnić może minimalną wymianę powietrza i jest korzystne dla użytkownika - równomierny napływ powietrza przez szczeliny, możliwość utrzymania drogi napływu powietrza na właściwym poziomie czystości. Ważnym jest jednak korzystanie z funkcji rozszczelniania w trakcie użytkowania mieszkania. Stąd należy raczej traktować możliwość napływu powietrza tą drogą, jako uzupełnienie dopływu powietrza - głównie realizowanego przez nawiewniki. Można tym sposobem zwiększyć wymianę powietrza, a co za tym idzie - poprawić jakość powietrza wewnętrznego.

Przy zastosowaniu stolarki okiennej z funkcją rozszczelniania (pozwalającej na uzyskanie wartości współczynnika infiltracji  $a = 1,0 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3})$ ) w stanie mikro-uchylecia nie jest możliwym uzyskanie satysfakcjonującej jakości powietrza. Satysfakcjonującą jakość powietrza może dać wymiana powietrza na poziomie minimum  $n = 1,0 \text{ h}^{-1}$ . Możliwym jest natomiast uzyskanie w przeważającej części sezonu grzewczego wartości  $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$ , czyli minimalnej ze względów higienicznych jakości powietrza, ale tylko dla mieszkań usytuowanych w niższych partiach budynku wielokondygnacyjnego. Przy niższych wartościach współczynnika infiltracji (poniżej 1,0

$m^3/(m \cdot h \cdot daPa^{2/3})$ ) nie jest możliwym uzyskanie nawet tak niskiej wymiany powietrza.

## 5. Wnioski

Wykorzystując przedstawiony wyżej, wielostrefowy model matematyczny przepływów powietrza w pomieszczeniach zlokalizowanych w obrębie mieszkania, można wystarczająco dokładnie dla zastosowań praktycznych, wykonywać analizy cieplne i środowiskowe. Program może być pomocą przy podejmowaniu decyzji projektowych, np. w przypadku brania pod uwagę przeważającego kierunku wiatru działającego na daną elewację, jako decydującego kryterium wpływającego na wymianę powietrza w pomieszczeniach.

Do analiz przepływów powietrza i migracji zanieczyszczeń najczęściej wykorzystywany jest program Contam W [13], jednakże scharakteryzowane wyżej narzędzie „AIR-3” zwłaszcza po usprawnieniu komunikacji użytkownika z plikami tekstowymi i uzupełnieniu narzędzia o dodatkowe efekty graficzne symulacji przepływów powietrza [8], a nazwane po usprawnieniach programem AS (AirSym)- również może być z powodzeniem wykorzystywane do komputerowej symulacji przepływów powietrza. Ponieważ program AirSym umożliwia także wizualizację intensywności wymian powietrza w pomieszczeniach, został np. zaproponowany [8] do wykorzystywania w zajęciach laboratoryjnych prowadzonych na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej.

## Literatura

- [1] Ding Z., Tamura Y.: Contributions of wind-induced overall and local behaviors for internal forces in cladding support components of large-span roof structure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier 2013, 115, p. 162-172.
- [2] Józwiak R., Kacprzyk J., Żurański J.A.: Wind tunnel investigations of interference effects on pressure distribution on a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier 1995, 57, p. 159-166.
- [3] Józwiak R., Kacprzyk J., Żurański J.A.: Influence of wind direction on natural ventilation of apartment buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 60 (1996) 167-176.
- [4] Miśniakiewicz, E.: Wymiana powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych i jej wpływ na jakość powietrza wewnętrznego. Rozprawa doktorska. Politechnika Opolska 2002 (nie publikowana).
- [5] Miśniakiewicz, E.: Model matematyczny dla określania przepływów i wymiany powietrza w mieszkaniach i pomieszczeniach mieszkalnych. Rozdział 8 pracy zbiorowej. Red. M. Dytczak: Modelowanie matematyczne procesów zaopatrzenia w ciepło i energię. Warszawa- Opole: Wydawnictwo Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych Energetyka i Środowisko 2006, s. 235- 249. ISBN 978-83-60837-38-2.
- [6] Miśniakiewicz, E.: Wykorzystanie wentylacji grawitacyjnej w budynku wielorodzinnym. Rzeszów: Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska 2012, z.59, s. 463-470. ISSN 0209-2646.
- [7] Miśniakiewicz, E.: Symulacje wymiany powietrza pomocą przy projektowaniu architektonicznym budynków mieszkalnych. Rzeszów: Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska 2006, z. 229, s. 329- 334. ISSN 0209-2646.
- [8] Moskała M.: Badania przepływów powietrza w mieszkaniach. Praca dyplomowa magisterska. Kierujący pracą: dr hab. inż. Marian B. Nantka, prof. Politechniki Śląskiej. Politechnika Śląska 2004.
- [9] Nantka M.B., Bieniek M.: Wentylacja a środowisko wewnętrzne w budynkach. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko. Research Reports. Mining and Environment. Kwartalnik. Quarterly. 2/2006, Główny Instytut Górnictwa. Katowice 2006, s. 47- 64. ISSN 1643-7608.
- [10] Sherman, M.H., Grimsrud, D.T., Diamond, R.C.: Infiltration-pressurization correlation: surface pressures and terrain effects. *ASHRAE Translation*, Part 2, 1979.
- [11] Swami, M.V., Chandra, S.: Correlation's for pressure distribution on buildings and calculation of natural ventilation airflow. *ASHRAE Transcation*, vol.94, Part 1, 1988.

[12] Swami, M.V., Chandra, S.: Procedures for Calculating Natural Airflow Rates in Building. Final Report of Florida Solar Energy Center FSEC-CR-163, 1987.

[13] Walton G.N.: Contam W. National Institute of Standards and Technology Documents, No. 5385. Gaithersburg 2002, USA.

Normy, wytyczne, instrukcje:

[N1] PN-EN 12831:2006 Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metody obliczania projektowego obciążenia cieplnego.

[R1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z dnia 15 czerwca 2002 r. Nr 75, poz. 690 z późn. zm.)

## **SIMULATION ANALYSIS OF INDOOR AIR QUALITY, AS A HELP IN ORGANIZATION OF AIRFLOW TO THE APARTAMENTS**

### **SUMMARY**

Paper presents basic rules describing function of natural ventilation system. It has been also presented a comparison of the simulation analysis selected results in the existing dwelling houses with natural ventilation. On the basic of performed simulation analysis introduction of various window types was proposed, e.g. depending on storey, for maintenance of accepted indoor air quality in the heating season. Presented proposition of diversity window woodwork types in respect of air inflow is addressed mostly to architecture designer.

### **KEYWORDS**

air exchange, architecture design, window woodwork tightness, computer simulations, multi-zone model.