

Maciej MIJAKOWSKI  
Politechnika Warszawska

## **SYMULACJA DZIAŁANIA WENTYLACJI NATURALNEJ WYKORZYSTUJĄCEJ NAWIEWNIKI POWIETRZA STEROWANE POZIOMEM WILGOTNOŚCI**

**Streszczenie.** W artykule porównano różne warianty nawiewu powietrza zewnętrznego do pomieszczenia wentylowanego w sposób naturalny. Jako kryterium porównawcze wybrano zapotrzebowanie na energię potrzebną do ogrzania powietrza wentylacyjnego oraz oferowaną przez system jakość powietrza wewnętrznego. Wyznacznikami jakości powietrza były zawartość wilgoci w powietrzu wewnętrznym oraz ilość powietrza wentylacyjnego przypadająca na osobę znajdującą się w pomieszczeniu. Analizowane pomieszczenie wyposażone jest w kanał wentylacji grawitacyjnej, a nawiew powietrza realizowany jest poprzez nieszczelności stolarki okiennej, typowy nawiewnik nieregulowany oraz poprzez nawiewnik powietrza sterowany poziomem wilgotności względnej w pomieszczeniu. dla takich warunków wyznaczony został przebieg strumienia powietrza wentylacyjnego oraz wilgotności względnej w ciągu sezonu ogrzewczego. Obliczenia wykonano przy zmiennej intensywności emisji wilgoci wewnątrz pomieszczenia, związanego z jego użytkowaniem przez jedną osobę oraz przy stałej wartości temperatury powietrza wewnętrznego.

## **SIMULATION OF NATURAL VENTILATION SYSTEM WITH HUMIDITY CONTROLLED AIR INLETS**

**Summary.** The paper presents comparison of different variants of supplying external air to naturally ventilated place. Consumption of heating energy and indoor air quality offered by ventilation system have been used as comparative criterions. The indoor air quality has been determined by concentration of water vapour in the internal air and ventilation rate per person staying in the room.

### **Opis układu i założone dane wejściowe**

Celem pracy było porównanie, w ramach jednego systemu wentylacji naturalnej, różnych wariantów nawiewu powietrza zewnętrznego do pomieszczenia. Jako kryterium porównawcze wybrano zapotrzebowanie na energię potrzebną do ogrzania powietrza wentylacyjnego oraz oferowane przez system wentylacji, a wymagane przez [10], warunki użytkowania

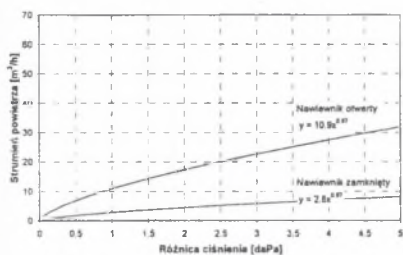
pomieszczenia, to jest ilość powietrza wentylacyjnego przypadająca na osobę znajdującą się w pomieszczeniu oraz możliwość wykroplenia się pary wodnej na wewnętrznych powierzchniach przegród zewnętrznych.

Analizie poddano następujące warianty dopływu powietrza do pomieszczenia:

Wariant 1: nawiew powietrza przez szczeliny okienne (okno o współczynniku infiltracji  $1.0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}\cdot\text{daPa}^{2/3})$ , [10] i długości szczelin 8 m).

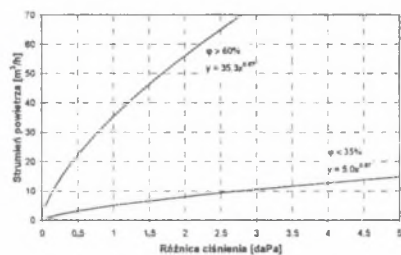
Wariant 2: nawiew powietrza przez dwa nawiewniki okienne (przybliżoną charakterystykę określoną na podstawie danych katalogowych przedstawiono na rys. 1, [4]) umieszczone w oknie o współczynniku infiltracji  $0.3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}\cdot\text{daPa}^{2/3})$ , [10] i długości szczelin 8 m, przy czym ze względu na możliwość regulacji stopnia otwarcia nawiewnika przez użytkownika wyróżniono wariant 2a (nawiewniki zamknięte) oraz wariant 2b (nawiewniki otwarte).

Wariant 3: nawiew powietrza przez dwa nawiewniki sterowane poziomem wilgotności względnej w pomieszczeniu (typ ZFH 40 o charakterystyce przedstawionej na rys. 2, [3]) umieszczone w oknie jak w wariacie 2.



Rys. 1. Charakterystyka nawiewnika - wariant 2, [4]

Fig. 1. Characteristic of air inlet - variant 2, [4]

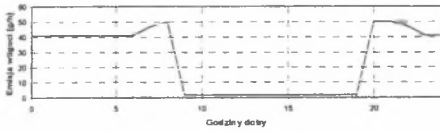


Rys. 2. Charakterystyka nawiewnika typu ZFH 40 - wariant 3, [3]

Fig. 2. Characteristic of humidity controlled air inlet - variant 3, [3]

Do analizy wybrano jedno z pomieszczeń typowego, piętrowego domu jednorodzinego, o stosunku boków 1:1, znajdującego się na przedmieściach Warszawy, na terenie o średniej gęstości zabudowy (wykładnik szorstkości aerodynamicznej terenu według [5] wynosi 0.25).

Ze względu na częste problemy związane z realizacją wymaganej jakości powietrza



Rys. 3. Dobowy schemat emisji wilgoci

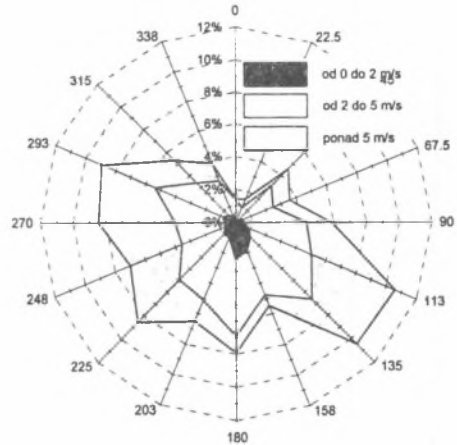
Fig. 3. Daily schedule of water vapour emission

z użytkowaniem pomieszczenia dobowy schemat emisji pary wodnej przedstawiono na rys. 3, [6]. Pomieszczenie, o kubaturze  $25 \text{ m}^3$ , wyposażone jest w kanał wentylacji grawitacyjnej o przekroju  $14 \times 14 \text{ cm}$ , długości  $1.5 \text{ m}$ . Suma oporów miejscowych kanału wynosi  $2.5$ , a chropowatość bezwzględna ścianek  $0.003 \text{ m}$ , [8]. Wylot końca kanału znajduje się na wysokości  $7 \text{ m}$ , natomiast współczynnik parcia wiatru przyjęto jako  $-0.55$  niezależnie od kierunku wiatru [5].

Zarówno nawiewniki, jak i szczeliny okienne znajdują się w ścianie o azymucie  $180^\circ$ , na wysokości  $4 \text{ m}$ . Założony profil współczynnika parcia wiatru dla tej płaszczyzny w zależności od kierunku przedstawiono w tabeli 1 [5].

Tabela 1.  
Profil współczynnika  
parcia wiatru

Kierunek	$C_p$
0	0.402
45	0.216
90	-0.295
135	-0.356
180	-0.243
225	-0.356
270	-0.295
315	0.216
360	0.402



Rys. 4. Róża wiatrów dolnych dla okresu zimowego, Warszawa-Okęcie

Fig. 4. Winter wind speed and direction – Warszawa Okęcie

W obliczeniach wykorzystano rzeczywiste dane pogodowe ze stacji meteorologicznej Warszawa - Okęcie dla okresu  $21.X.1990 \div 4.V.1991$ . Zestawienie najważniejszych danych charakteryzujących warunki pogodowe przedstawiono na rys. 4 oraz w tabeli 2.

Tabela 2

Zestawienie najważniejszych danych charakteryzujących warunki pogodowe

	Średnia	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe
Temperatura [°C]	2.25	-20.39	18.20	5.77
Prędkość wiatru [m/s]	4.32	0.00	12.00	2.15
Wilgotność względna	83%	31%	100%	12%

## Metodyka obliczeń

Analizowane pomieszczenie potraktowano jako pojedynczą strefę wydzieloną z przestrzeni wewnętrznej budynku. Przyjęto, że ze względu na spełnianą przez nie funkcję sypialni, drzwi wewnętrzne pozostają praktycznie cały czas zamknięte, a przepływy powietrza w ich szczelinach w stosunku do strumienia w kanale grawitacyjnym są mało znaczące i dlatego zostały pominięte. Oznacza to, że wymiana powietrza występuje jedynie pomiędzy analizowanym pomieszczeniem i przestrzenią zewnętrzną budynku. Ponadto założono, że w pomieszczeniu panuje stała temperatura powietrza wewnętrznego.

Przyjęte założenia pozwoliły na zredukowanie analizowanego problemu do wyznaczenia przepływów powietrza oraz wilgotności względnej w układzie jednostrefowym skali makro. Dla takiego przypadku można zastosować równanie bilansujące  $k$  przepływów powietrza  $M_i$ , [1]:

$$\sum_{i=1}^k M_i = \sum_{i=1}^k f_i(\Delta P_i) = \sum_{i=1}^k C_i(\Delta P_i)^{n_i} = 0, \quad (1)$$

gdzie:

$C_i, n_i$  - parametry określające charakterystykę  $i$ -tej drogi przepływu powietrza, przy czym w ostatnim wariancie obliczeń współczynnik  $C_i$  jest funkcją wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu,

$\Delta P_i$  - różnica ciśnienia na  $i$ -tej drodze przepływu powietrza,

oraz równanie różniczkowe bilansujące masę pary wodnej w powietrzu wewnętrznym:

$$\frac{d m_{\text{H}_2\text{O}}}{d t} = E_{\text{H}_2\text{O}} + V \cdot (x_e - x_i) \quad (2)$$

gdzie:

$m_{H_2O}$  - masa pary wodnej w pomieszczeniu,

$E_{H_2O}$  - emisja pary wodnej w pomieszczeniu,

$V$  - strumień powietrza przepływający przez pomieszczenie,

$x_e, x_i$  - zawartość wilgoci w powietrzu zewnętrznym i wewnętrznym.

Bilansując masę pary wodnej pominięto wykraplanie oraz odparowywanie wilgoci z powierzchni przegród zewnętrznych, natomiast przy zawartości pary wodnej w powietrzu wewnętrznym, równej i większej od stanu nasycenia przyjęto wilgotność względną równą 100%.

Rozwiązanie powyższych równań pozwala na wyznaczenie przebiegu zmienności strumienia powietrza wentylacyjnego oraz wilgotności względnej w pomieszczeniu.

## Wyniki obliczeń

Obliczenia, z krokiem czasowym wynoszącym jedną godzinę, przeprowadzono dla całego sezonu ogrzewczego, to jest dla okresu od 21.X.1990 do 4.V.1991, co stanowi ponad 4500 godzin. Przebiegi zmienności strumienia powietrza wentylacyjnego oraz wilgotności względnej powietrza wewnętrznego dla kolejnych wariantów obliczeń przedstawiono na poniższych wykresach (rys. 5, 6, 7). W przypadku wariantu drugiego przedstawiono zakresy strumienia i wilgotności odpowiadające nawiewnikom zamkniętym (wariant 2a) oraz otwartym (wariant 2b). Ponadto w tabeli 3 zestawiono najważniejsze dane liczbowe podsumowujące przebiegi na wykresach, rozszerzone o charakterystykę strumienia powietrza wentylacyjnego dla okresu użytkowania pomieszczenia -  $V'$  oraz zapotrzebowanie na ciepło do ogrzania powietrza wentylacyjnego. W tabeli 3 przedstawiono również dane dotyczące hipotetycznego wariantu 2', który odpowiadałby każdorazowemu otwieraniu nawiewnika przy wejściu użytkownika do pomieszczenia i zamykaniu przy jego wyjściu.

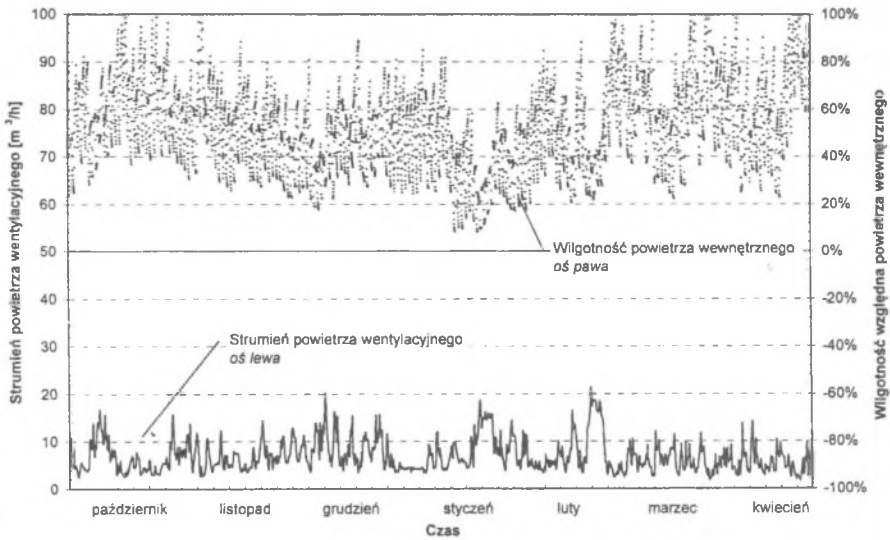
Tabela 3

## Zestawienie wyników obliczeń

Wariant	Wielkości charakterystyczne*	Jednostki	Wartości wielkości charakterystycznych:			
			średnia	minimum	maksimum	SD**
Wariant 1	$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	6.96	1.35	21.42	3.41
	$\dot{V}'$	m <sup>3</sup> /h	6.77	1.35	20.19	3.31
	$\varphi_i$	-	52.6%	8.0%	100.0%	19.0%
	$Q_a$	kWh/(m <sup>3</sup> ·sez.)	7.90 (21.X.1990 ÷ 4.V.1991)			
Wariant 2a	$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	6.96	1.35	21.42	3.41
	$\dot{V}'$	m <sup>3</sup> /h	6.77	1.35	20.19	3.31
	$\varphi_i$	-	52.6%	8.0%	100.0%	19.0%
	$Q_a$	kWh/(m <sup>3</sup> ·sez.)	7.90 (21.X.1990 ÷ 4.V.1991)			
Wariant 2b	$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	20.79	4.07	63.77	10.15
	$\dot{V}'$	m <sup>3</sup> /h	20.23	4.07	60.10	9.86
	$\varphi_i$	-	36.9%	5.9%	85.7%	12.9%
	$Q_a$	kWh/(m <sup>3</sup> ·sez.)	23.59 (21.X.1990 ÷ 4.V.1991)			
Wariant 2'	$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	14.25	1.62	60.10	10.03
	$\dot{V}'$	m <sup>3</sup> /h	20.23	4.07	60.10	9.86
	$\varphi_i$	-	38.3%	7.6%	85.7%	12.6%
	$Q_a$	kWh/(m <sup>3</sup> ·sez.)	16.65 (21.X.1990 ÷ 4.V.1991)			
Wariant 3	$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	16.54	2.95	95.52	11.08
	$\dot{V}'$	m <sup>3</sup> /h	19.31	3.58	73.83	10.52
	$\varphi_i$	-	37.0%	7.2%	75.4%	10.2%
	$Q_a$	kWh/(m <sup>3</sup> ·sez.)	16.99 (21.X.1990 ÷ 4.V.1991)			

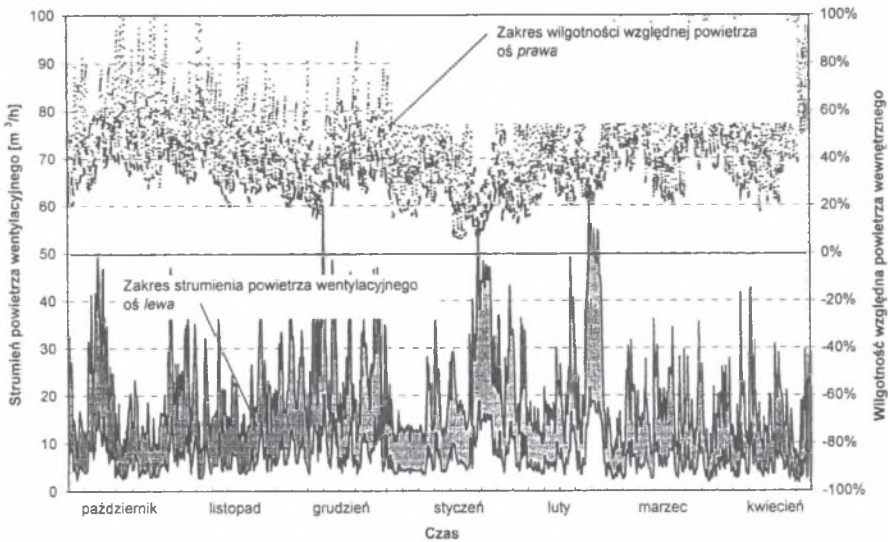
\* oznaczenia:  $\dot{V}$  - strumień powietrza wentylacyjnego,  $\dot{V}'$  - strumień powietrza wentylacyjnego w okresie użytkowania pomieszczenia,  $\varphi_i$  - wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu,  $Q_a$  - całosezonowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzania powietrza wentylacyjnego,

\*\* SD - odchylenie standardowe,



Rys. 5. Przebiegi zmienności strumienia powietrza wentylacyjnego oraz wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, wariant 1

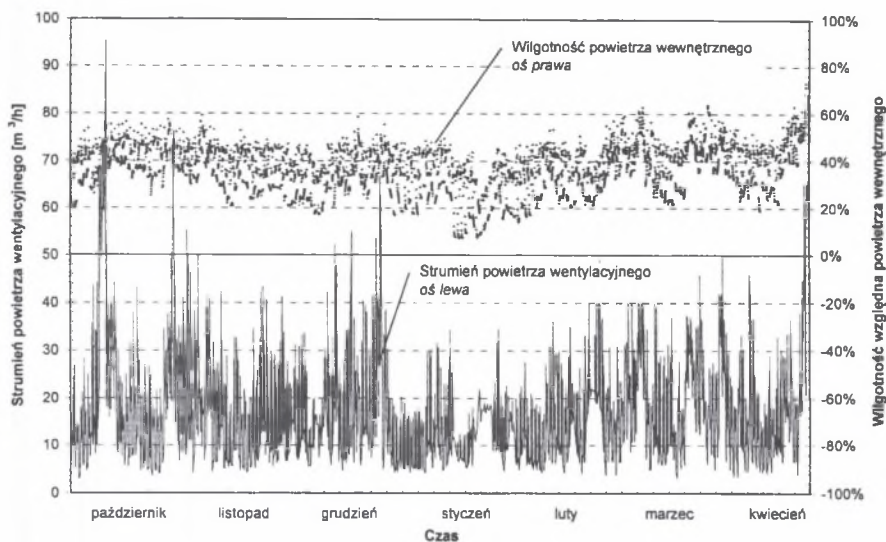
Fig. 5. Variations in ventilation rate and humidity of internal air during the heating season, variant 1



Rys. 6. Przebiegi zmienności strumienia powietrza wentylacyjnego oraz wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, wariant 2

Fig. 6. Variations in ventilation rate and humidity of internal air during the heating season, variant 2

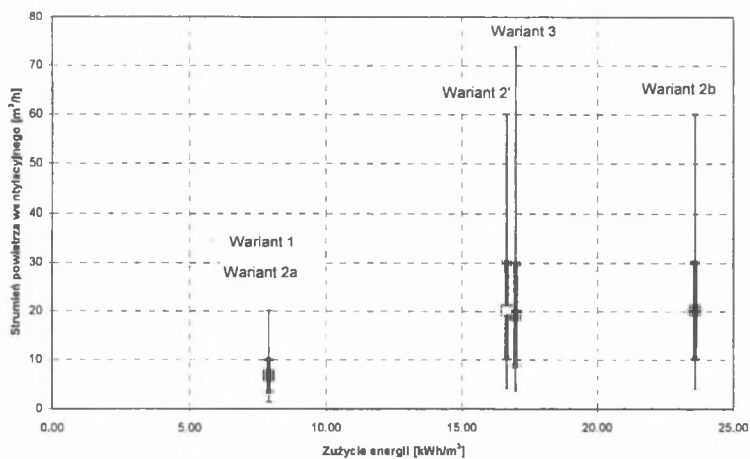




Rys. 7. Przebiegi zmienności strumienia powietrza wentylacyjnego oraz wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, wariant 3

Fig. 7. Variations in ventilation rate and humidity of internal air during the heating season, variant 3

Na podstawie danych zawartych w tabeli 3 sporządzono wykres zależności średniego strumienia powietrza wentylacyjnego dla okresu użytkowania pomieszczenia od całosezonowego zapotrzebowania na ciepło w poszczególnych wariantach (rys. 8). Punkty wykresu uzupełniono o wartości odchylenia standardowego oraz godzinowe wartości minimalne i maksymalne.



Rys. 8. Zależność średniego strumienia powietrza dla okresu użytkowania pomieszczenia od zapotrzebowania na ciepło w poszczególnych wariantach

Fig. 8. Dependence between average airflow and energy consumption for all variants



Na podstawie zaprezentowanych wyników można stwierdzić, że:

- dla wariantu 2b oraz 3 średnia wymiana powietrza jest podobna i wynosi około  $0.75 \text{ h}^{-1}$ , w pozostałych przypadkach nie przekracza  $0.3 \text{ h}^{-1}$ ,
- w wariantcie 3 przebieg strumienia powietrza wentylacyjnego charakteryzuje się największą zmiennością (odchylenie standardowe ponad  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ) wynikającą z dostosowywania wymiany powietrza do zawartości pary wodnej w powietrzu wewnętrznym,
- równocześnie wariant 3 charakteryzuje się najmniejszymi wahaniami w przebiegu zmienności wilgotności względnej powietrza (odchylenie standardowe około 10%) oraz najmniejszą wartością maksymalną wilgotności względnej (75.4%), podczas gdy dla wariantu 1 oraz 2a wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu jest bardzo wysoka i dochodzi do 100%,
- średnia wymiana powietrza dla okresów użytkowania pomieszczenia w wariantcie 3 wzrasta o 17% w stosunku do średniej całosezonowej wymiany powietrza,
- średni strumień powietrza wentylacyjnego dla okresu użytkowania pomieszczenia dla wariantu 3 jest o 5% mniejszy w porównaniu do wariantu 2b, jednak równocześnie zapotrzebowanie na ciepło do ogrzania powietrza wentylacyjnego jest mniejsze o 39% (rys. 8),
- konkurencyjny w stosunku do wariantu 3 jest hipotetyczny wariant 2', jednak dla tego przypadku wzrost, porównywanej wcześniej, średniej wymiany powietrza następuje częściowo na skutek zwiększenia intensywności wentylacji w okresach niskich temperatur zewnętrznych, a więc wtedy, kiedy użytkownik wbrew założeniom zamykałby nawiewnik.

Analizę funkcjonowania poszczególnych wariantów nawiewu powietrza uzupełniono o obliczenie zakresu spełnienia wymagań dotyczących:

- strumienia powietrza wentylacyjnego (zapewniający przynajmniej  $1.0 \text{ h}^{-1}$  [9]),
- wilgotności względnej w pomieszczeniu (temperatura wewnętrznych powierzchni nieprzeźroczystych przegród zewnętrznych o założonym współczynniku przenikania ciepła równym  $0.30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  wyższa o jeden stopień od temperatury nasycenia [10]).

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4

## Zestawienie częstości spełnienia założonych wymagań\*

Wariant	$\dot{V} \geq 25 \text{ m}^3/\text{h}$	$\dot{V}' \geq 25 \text{ m}^3/\text{h}$	$\vartheta_i > t_{nas} + 1^\circ$
wariant 1	0.0%	0.0%	96.8%
wariant 2a	0.0%	0.0%	96.8%
wariant 2b	26.0%	23.3%	100.0%
wariant 2'	12.6%	23.3%	100.0%
wariant 3	17.0%	23.0%	100.0%

\* oznaczenia:  $\dot{V}$  - strumień powietrza wentylacyjnego,  $\dot{V}'$  - strumień powietrza wentylacyjnego dla okresu użytkowania pomieszczenia,  $\vartheta_i$  - wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu,  $\vartheta_i$  - temperatura na wewnętrznej powierzchni przegrody zewnętrznej,  $t_{nas}$  - temperatura punktu rosy.

Na podstawie danych zaprezentowanych w tabeli 4 można stwierdzić, że zarówno nawiew powietrza poprzez szczeliny okienne, jak i zamknięty nawiewnik nie spełniają wymagań dotyczących ilości powietrza wentylacyjnego. W pozostałych przypadkach, mimo że średnia wymiana powietrza dla okresu użytkowania pomieszczenia wynosi około  $0.8 \text{ h}^{-1}$  (tabela 3), zapewnia to jedynie poniżej 25% częstość spełnienia wymagań przewidzianych przez [9]. Brak problemów z wykraplaniem pary wodnej na wewnętrznych powierzchniach przegród zewnętrznych wynika z przyjęcia niskiego współczynnika przenikania ciepła. Można przewidywać, że w warunkach rzeczywistych, szczególnie przy istnieniu mostków termicznych, problem wilgoci przy ilościach powietrza wentylacyjnego charakterystycznych dla wariantów 1 i 2a byłby bardziej znaczący.

## Podsumowanie

Spśród analizowanych wariantów najbardziej skuteczny okazuje się wariant 3, czyli nawiew powietrza poprzez nawiewnik sterowany poziomem wilgotności względnej w pomieszczeniu. Zapewnia on najmniejszą wartość maksimum wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu oraz stosunkowo wysoką wartość średniego strumienia powietrza wentylacyjnego w okresie użytkowania pomieszczenia, przy względnie niskim zapotrzebowaniu na ciepło do ogrzania powietrza wentylacyjnego.

Przy założeniu ograniczonego zaangażowania użytkownika w regulowanie wymiany powietrza (realizacja wariantu 2'), sterowanie ilością powietrza wentylacyjnego za pomocą sygnału wilgotności względnej prowadzi do zapewnienia możliwie najlepszego w warunkach

wentylacji naturalnej dopasowania wymiany powietrza do aktualnych potrzeb [2]. Spośród zalet tego systemu wymienić można:

- wzrost wymiany powietrza w okresie użytkowania pomieszczenia,
- ograniczenie zbyt dużego ciśnienia czynnego w okresach niskiej temperatury zewnętrznej (skorelowanej z niską zawartością wilgoci w powietrzu zewnętrznym),
- wyrównanie przebiegu wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu (ograniczenie występowania skrajnie suchego oraz wilgotnego powietrza wewnętrznego).

## LITERATURA

1. ASHRAE Handbook, „Fundamentals”, SI Edition, Atlanta, USA, 1997.
2. Cohas M., Grelat A., Creuzevault D., Fauconnier R., Lemaire M. C., Loewenstein J. C., Giat M : Corrélation entre concentraton en CO<sub>2</sub> et condensation dans l’habitat en période d’occupation, CVC, 3 / 1995.
3. Katalog „Hinweise zur Anordnung der AERECO - System - Elemente”.
4. Katalog produktów ATC Poland spółka z o.o.
5. Liddament M. W: A Guide to Energy Efficient Ventilation, Air Infiltration and Ventilation Centre, 1996.
6. Malicki M.: Wentylacja i klimatyzacja, PWN, Warszawa 1980.
7. Mijakowski M., Sowa J.: Symulacja działania wentylacji naturalnej w „energooszczędnym” budynku jednorodzinym o lekkiej konstrukcji, IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, „Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowania na energię.” Kraków - Mogilany, 14 października 1998.
8. Nowakowski E.: Strumienie objętości powietrza w przewodach wentylacji grawitacyjnej, COW nr 10, 11 / 1997.
9. PN-83 / B-03430. Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania.
10. Rozporządzenie ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa z dnia 14 grudnia 1994 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz. U. nr 15 z dnia 25 lutego 1999.

**Abstract**

The paper presents comparison of different variants of supplying external air to naturally ventilated place. Consumption of heating energy and indoor air quality offered by ventilation system have been used as comparative criterions. The indoor air quality has been determined by concentration of water vapour in the internal air and ventilation rate per person staying in the room.

Analysed space has been equipped with ventilation chimney, and air has been supplied by leakage in window frame in first variant, standard air inlets in second and humidity controlled air inlets in third variant. For these variants the ventilation rate and internal concentration of water vapour during the heating season have been calculated. This has been the base for energy consumption and indoor air quality analyses.

Analysed room has been used as a single bedroom and changes in water vapour emission connected with this were taken into consideration. For the simulation constant internal temperature has been presumed.