

KAROL BIERNACKI¹
JERZY Z. PIOTROWSKI²

Kielce University of Technology

¹ e-mail: biernackikarol2@gmail.com

² e-mail: piotrowski@tu.kielce.pl

PROCESSES MODELLING IN TWO-NAVE BUILDING WITH NATURAL AIR EXCHANGE

Abstract

The paper explains ventilation air exchange driven by the gravitational force and wind, and the major factors affecting the phenomenon. A mathematical model, namely a system of equations, for computations of natural ventilation in two-bay building is presented. The model was used to make calculations of the amount of ventilation air and the pressure inside the building. The effect of external temperature and wind velocity on the amount of ventilation air and pressure values inside the building was analysed. Aerodynamics of multi-zone building ventilation is a complex process. It is difficult to both to determine the pressure prevailing inside the building and to select the area of ventilation openings. The literature does not provide dependences for making computations for such buildings, while computer methods are too time-consuming.

Keywords: natural ventilation, gravitational forces, wind action, multi-zone buildings

1. Introduction

The purpose of the ventilation system is to exchange air in the building. The system effectiveness depends on the delivery of the fresh air, ensuring appropriate air flow between rooms and effective removal of waste air. In ventilation, the technology of forming air flows in the rooms, based on the knowledge of ventilation aerodynamics, plays a crucial role.

For natural ventilation, the inflow of external air occurs through the building leakage (infiltration) and ventilation openings, without using a mechanical system powered by electricity. The processes that occur in natural ventilation and types of this ventilation were described, among others, in [1, 2, 3, 4].

Three types of natural ventilation can be differentiated:

- airing, which results from opening the windows,
- gravitational ventilation, provided by vertically installed ducts or ventilation openings located at different heights,
- transverse (wind) ventilation, characterised by air flow induced by the pressure action on the building envelope.

2. Factors inducing air movement within the building indoor space

The key feature of natural ventilation is that air flow is induced only by pressure difference, the action of the wind and the gravitational force, which are caused by temperature differences inside and outside the building. Both factors vary in time, which makes it difficult to determine the correct size of ventilation openings.

2.1. Natural ventilation induced by the gravitational forces

To determine the pressure difference caused by the gravitational force (3) acting on a given surface, it is necessary to determine, on the basis of the dependences below, pressure outside (1) and inside the building (2) [1, 4, 5].

$$\begin{aligned} P_{I-1}^z &= \frac{F_1}{S} = \frac{m_z \times g}{S} = \frac{V \times \rho_z \times g}{S} = \\ &= \frac{S \times h \times \rho_z \times g}{S} = h \times \rho_z \times g [Pa] \end{aligned} \quad (1)$$

$$P_{I-I}^w = \frac{F_2}{S} = \frac{m_w \times g}{S} = \frac{V \times \rho_w \times g}{S} = \frac{S \times h \times \rho_w \times g}{S} = h \times \rho_w \times g [Pa] \quad (2)$$

$$\Delta P = P_{I-I}^z - P_{I-I}^w = (h \times \rho_z \times g) - (h \times \rho_w \times g) = h \times (\rho_z - \rho_w) \times g \quad (3)$$

The air flow through the building indoor space is presented in Figure 1. Major parameters that affect air movement induced by the gravitational force include the following: distance h between the supply and exhaust openings and temperature difference inside and outside the building, thus the difference in the air density ρ .

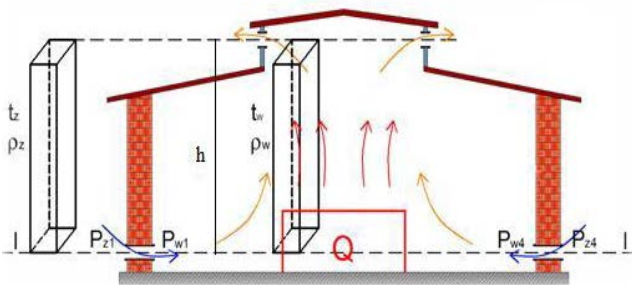


Fig. 1. In-room air flow caused by the gravitational force

2.2. Natural ventilation driven by the wind

The impact of wind on the building envelope produces positive pressure on the exterior closures on the building windward side, whereas on the building leeward side, negative pressure is created. In the action of wind around the building, the wind dynamic pressure p_d increases, whereas the static pressure p_s decreases. That is related to the air potential energy conversion to kinetic energy [4].

To determine the magnitude of positive or negative pressure (6) outside the building, created due to the wind action, it is necessary to know the values of the aerodynamic parameters (4). The value of the aerodynamic parameter expresses the ratio of the static pressure at a given point of the exterior closure to the wind dynamic pressure (5) [6].

$$K = \frac{p_s}{p_d} [-] \quad (4)$$

$$p_d = \frac{v^2}{2} \times \rho_z \quad [Pa] \quad (5)$$

$$p = K \times p_d \quad [Pa] \quad (6)$$

$$\Delta P = p_z - p_w = K \times \frac{v^2}{2} \times \rho_z - p_w \quad (7.1)$$

$$\Delta P = p_w - p_z = p_w - K \times \frac{v^2}{2} \times \rho_z \quad (7.2)$$

If those values, and the values of negative and positive pressures p_w in the building are known, it is possible to determine pressure difference in individual openings (6). If the pressure inside the building is lower than the pressure outside, (7.1) is employed, otherwise, (7.2) is used.

When pressure difference in ventilation openings, induced the gravitational force and the wind action are known, it is possible to determine the stream of ventilation air. It should be remembered, however, that the balance of air amount must be maintained.

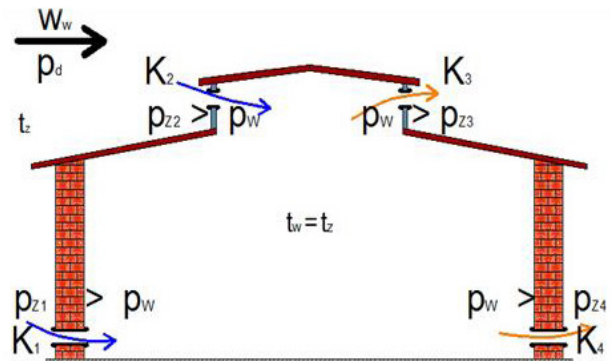


Fig. 2. In-room air movement caused by the wind

3. Ventilation computations in multi-zone buildings

Many models are available to predict air flow within the building. Those can be categorised as empirical, theoretical, network, zonal or Computational Fluid Dynamics (CFD) ones [7, 8, 9, 10]. The simplified formula for the phenomenon description in empirical or theoretical models makes it possible to calculate the amount of ventilation air relatively quickly, but those calculations yield only inferred values. Those can be applied, similar to empirical models, for estimating air flow in single-zone buildings.

Network, zonal or CFD models allow predicting air flow in multi-zone buildings. However, the literature on the subject is sparse. The reason might be the fact that the application of those techniques to natural ventilation is extremely time-consuming.

Air stream distribution in individual ventilation openings is presented in the physical model (Fig. 3). Fresh air is supplied into the room through the openings 1 and 4. The exhaust air outlets are openings

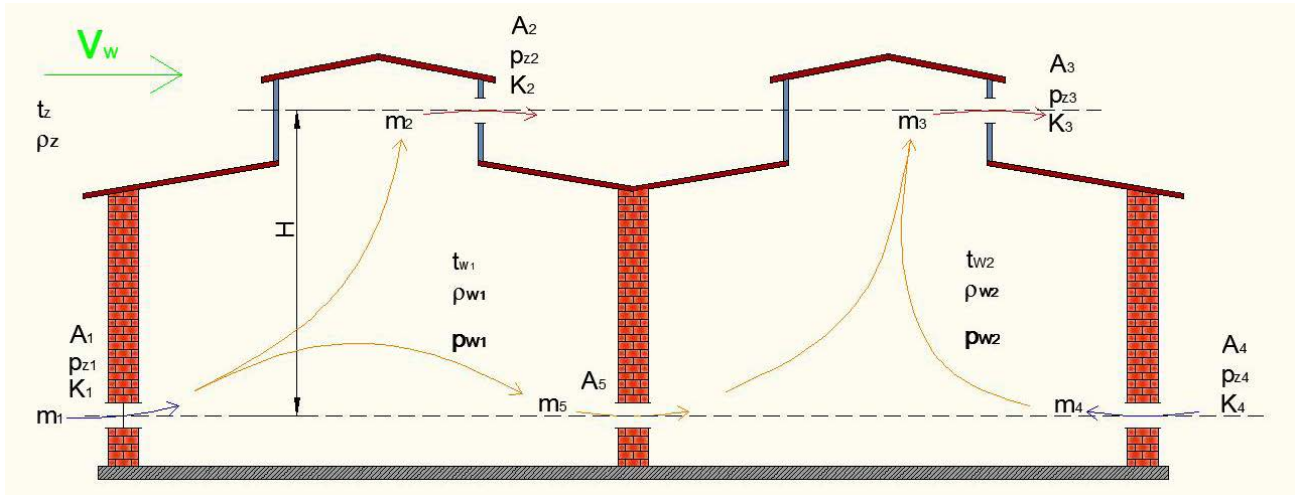


Fig. 3. The physical model showing natural ventilation operation in the two-bay building

2 and 3. Opening 5, located between the bays, allows air flow from the first to the second bay.

The mathematical model (8) in the form of the system of equations, describing the air movement within two-bay building, is presented below. The model is used to determine the amount of ventilation air flowing through individual openings. Maintaining mass flux balance is taken into account. The model can also be employed to determine positive and negative pressures prevalent in the individual bays of the building.

$$\left\{ \begin{aligned}
 & H \times (\rho_z - \rho_{w1}) \times g + K_1 \times \frac{v_w^2}{2} \times \rho_z - p_{w1} = \\
 & = \frac{1}{\mu^2 \times 2 \times A_1^2 \times \rho_z} \times m_1^2 + \frac{1}{\mu^2 \times 2 \times A_2^2 \times \rho_z} \times m_2^2 + \\
 & \quad + \frac{1}{\mu^2 \times 2 \times A_5^2 \times \rho_z} \times m_5^2 \\
 & p_{w1} - K_2 \times \frac{v_w^2}{2} \times \rho_z = \frac{1}{\mu^2 \times 2 \times A_2^2 \times \rho_z} \times m_2^2 \\
 & H \times (\rho_{w1} - \rho_{w2}) \times g + p_{w1} - p_{w2} = \\
 & = \frac{1}{\mu^2 \times 2 \times A_3^2 \times \rho_z} \times m_3^2 + \frac{1}{\mu^2 \times 2 \times A_4^2 \times \rho_z} \times m_4^2 \\
 & p_{w2} - K_3 \times \frac{v_w^2}{2} \times \rho_z = \frac{1}{\mu^2 \times 2 \times A_3^2 \times \rho_z} \times m_3^2 \\
 & H \times (\rho_z - \rho_{w2}) \times g + p_{w1} + K_4 \times \frac{v_w^2}{2} \times \rho_z = \\
 & = \frac{1}{\mu^2 \times 2 \times A_4^2 \times \rho_z} \times m_4^2 + \frac{1}{\mu^2 \times 2 \times A_5^2 \times \rho_z} \times m_5^2 \\
 & m_1 = m_2 + m_5 \\
 & m_3 = m_4 + m_5
 \end{aligned} \right. \quad (8)$$

where:

- H – height between ventilation openings [m];
- ρ_i – air density [kg/m^3];
- g – gravitational acceleration [m/s^2];
- K_i – aerodynamic coefficient [-];
- v_w – wind velocity [m/s];
- p_{zi} – positive or negative pressure outside the building [Pa];
- p_{wi} – positive or negative pressure inside the building [Pa];
- A_i – cross-sectional area of ventilation openings [m^2];
- m_i – mass flux of the airflow [kg/s];
- μ – local resistance in the ventilation opening [-].

4. Computational results and their analysis

Mathcad software was used to compute air stream and positive pressures in individual bays of the building. On the basis of the model developed, computations were performed for the exemplary data:

- $H = 12$ m; $g = 9.81$ m/s^2 ; $v_w = 1.0$ m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s;
- $\rho_z = 1.248$ kg/m^3 for an external temperature of 10°C;
- $\rho_z = 1.27$ kg/m^3 for an external temperature of 5°C;
- $\rho_{w1} = 1.205$ kg/m^3 for the temperature of 20°C in the first bay;
- $\rho_{w2} = 1.185$ kg/m^3 for the temperature of 25°C in the second bay;
- $K_1 = 0.6$; $K_2 = -0.5$; $K_3 = -0.45$; $K_4 = -0.4$;
- $A_1 = 20$ m^2 ; $A_2 = 15$ m^2 ; $A_3 = 20$ m^2 ; $A_4 = 10$ m^2 ; $A_5 = 30$ m^2 .

The computations were made for three different wind velocities and two temperatures of the external air. On the basis of computational results, it is possible to assume that the model developed by the author was correct, because the balance of mass fluxes was maintained ($m_1 = m_2 + m_5$ and $m_3 = m_4 + m_5$).

Table 1. Results of computations of the air stream flowing through the building

v_w	t_z	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	p_{w1}	p_{w2}
m/s	[°C]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[Pa]	[Pa]
1	5	56.74	42.66	44.86	30.78	14.08	7.63	4.74
	10	45.80	34.02	38.04	26.26	11.78	4.74	3.33
1,5	5	56.96	42.25	44.38	29.67	14.71	7.08	4.28
	10	46.06	33.53	37.49	24.96	12.53	4.21	2.88
2	5	57.26	41.62	43.67	28.03	15.64	6.29	3.62
	10	46.42	32.77	36.67	23.02	13.65	3.44	2.23

For the external temperature of 5°C, the air exchange rate is much higher than for the external temperature of 10°C. That results from the fact that the values of mass fluxes in individual ventilation openings for the temperature of 5°C (Fig. 4) are greater than the values of the same parameter for the temperature of 10°C. It happens so because, for the lower external temperature, the difference in air density inside and outside the building is higher, which enhances air exchange. Figures 4 and 5 indicate that a change in the wind velocity does not significantly affect the amount of ventilation air.

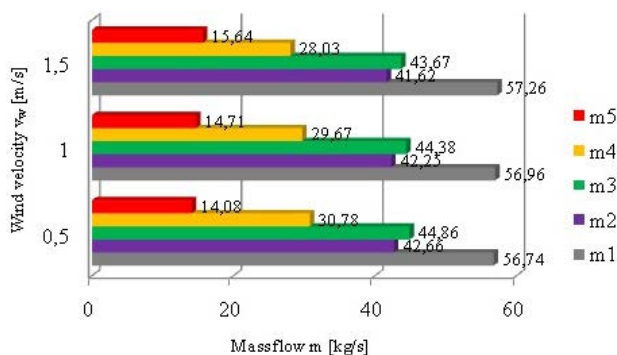


Fig. 4. Values of mass fluxes in the ventilation openings for different wind velocities at the external temp. of 5°C

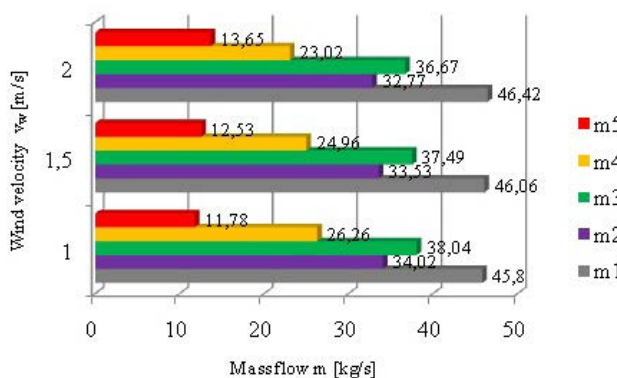


Fig. 5. Values of mass fluxes in the ventilation openings for different wind velocities at the external temp. of 10°C

Positive pressure created in each bay inside the building decreases with an increase in wind velocity and temperature (Fig. 6). The pressure shows higher values for the external temperature of 5°C, which is caused by a greater pressure difference inside and outside the building. It can be assumed that with a further increase in wind velocity, negative pressure will be created in the building, which may lead to a change in the operation of ventilation openings, namely instead of supplying the air, they will extract it. As wind velocity and temperature constantly fluctuate, it is difficult to determine the optimal area of ventilation openings. It should also be noted that the value of the pressure inside the building does not significantly affect the amount of ventilation air.

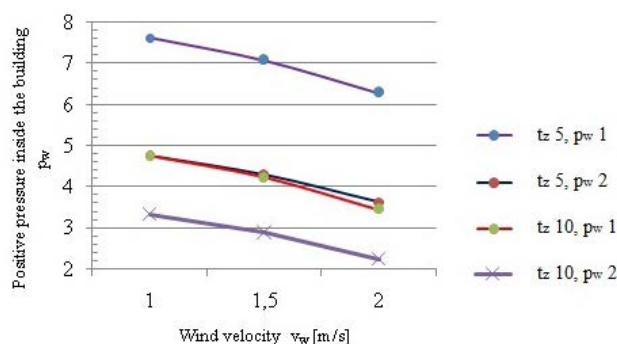


Fig. 6. Values of negative pressure in individual bays of the building for different wind velocities and external temperatures

5. Conclusions

Architects or design engineers, who are usually not concerned about issues related to aerodynamic processes occurring in the building, reduce the problem to the installation of air-conditioning systems. The activities aimed at lowering the energy demand to protect the natural environment have enhanced interest in natural ventilation.

The reason why an attempt was made to investigate the aerodynamic processes involved in natural ventilation is related to the issues of air distribution in various zones of the building. Performing computations for natural ventilation in multi-zone buildings, e.g. the ones having many bays, is a very complex process, in which multiple assumptions need to be made. The models that would make it possible to compute ventilation aerodynamics in such structures are not available. The amount of air is determined on the basis of heat load. The air distribution and the values of negative and positive pressure in individual bays are assumed. These assumptions are based on estimations depending on

various types of building occupancy, which may lead to erroneous results of calculations.

References

- [1] Allard F.; *Natural ventilation in buildings: a designed handbook*. James & James, 1998.
- [2] Baturin W.W.; *Wentylacja naturalna w zakładach przemysłowych*. Arkady, Warszawa 1974.
- [3] Kreider J.F.; *Handbook of heating, ventilation and air conditioning*. Boca Raton, CRC Press LLC. 2001.
- [4] Malicki M.; *Wentylacja przemysłowa*, Arkady, Warszawa 1967.
- [5] Piotrowski J.Z.; *Przepływ powietrza przez przegrody i pomieszczenia budynku*. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2013.
- [6] ASHRAE *Fundamentals Handbook, Ch. 26, Ventilation and infiltration*. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta 2001.
- [7] Awbi H.B.; *Ventilation of buildings*. Chapman & Hall, 1991.
- [8] Awbi H.B.; *Application of computational fluid dynamics in room ventilation*. Building and Environment, 24, 73-84.
- [9] Bzowska D.; *Dynamika procesów wymiany ciepła i naturalnej wymiany powietrza w budynkach o różnej strukturze materiałowej przegród*. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2007.
- [10] Clifford M., Hand J., Clarke R., Riffat S.; *Using computational fluid dynamics as a tool for naturally ventilated buildings*. Building and Environment, 32(4), 305-312, 1997.

Karol Biernacki
Jerzy Zb. Piotrowski

Modelowanie procesów w budynkach dwunawowych z naturalną wymianą powietrza

1. Wstęp

Zadaniem systemu wentylacji jest wymiana powietrza w budynku. Jej skuteczność zależy od właściwego doprowadzenia powietrza świeżego, zapewnienia odpowiedniego przepływu pomiędzy pomieszczeniami i sprawnego usunięcia powietrza zanieczyszczonego. W technice wentylacji istotną rolę odgrywa technologia formowania przepływów powietrza w pomieszczeniach, której podstawą jest znajomość aerodynamiki wentylacji.

Dopływ powietrza zewnętrznego dla wentylacji naturalnej odbywa się przez nieszczelności (infiltracja) oraz otwory wentylacyjne w budynku, bez wspomaganie urządzeniami zasilanymi elektrycznie. Procesy zachodzące przy wentylacji naturalnej oraz jej podział zostały opisane m.in. w [1, 2, 3, 4].

Wyróżnia się 3 rodzaje wentylacji naturalnej:

- wietrzenie – następuje w wyniku otwierania okien,
- wentylacja grawitacyjna – za pomocą przewodów zamontowanych pionowo lub otworów wentylacyjnych usytuowanych na różnych wysokościach,
- wentylacja poprzeczna (wiatrowa) – charakteryzuje

przepływ powietrza wywołany przez wpływ ciśnienia wiatru na fasady budynku.

2. Czynniki powodujące ruch powietrza w budynku

Główną cechą wentylacji naturalnej jest to, że przepływ powietrza następuje tylko na skutek różnicy ciśnień, w wyniku działania wiatru i sił grawitacji, które wywołane są różnicą temperatur panujących na zewnątrz i wewnątrz budynku. Oba te czynniki zmieniają się w czasie, co powoduje trudności w wyznaczeniu prawidłowej wielkości otworów wentylacyjnych.

2.1. Wentylacja naturalna spowodowana siłami grawitacji

W celu wyznaczenia różnicy ciśnień spowodowanej siłami grawitacji (3) oddziałującymi na daną powierzchnię należy z zależności wyznaczyć ciśnienie na zewnątrz (1) oraz wewnątrz budynku (2) [1, 4, 5].

Przepływ powietrza przez budynek spowodowany siłami grawitacji przedstawia rysunek 1. Głównymi parametrami wpływającymi na ruch powietrza spowodowany siłami grawitacji są: odległość wysokości h pomiędzy otworami nawiewnymi i wywiewnymi

oraz różnica temperatur wewnątrz i na zewnątrz budynku, a co za tym idzie różnica gęstości powietrza ρ .

2.2. Wentylacja naturalna spowodowana działaniem wiatru

Działanie wiatru na budynek wytwarza na jego przegrodach od strony nawietrznej nadciśnienie natomiast od strony zawietrznej podciśnienie. Podczas działania wiatru w pobliżu budynku wzrasta ciśnienie dynamiczne wiatru p_d , natomiast maleje ciśnienie statyczne p_s . Jest to związane z zamianą energii potencjalnej powietrza na energię kinetyczną [4].

Aby wyznaczyć wielkość nadciśnienia lub podciśnienia (6) na zewnątrz budynku w wyniku działania wiatru należy znać wartości współczynników aerodynamicznych (4). Wartość współczynnika aerodynamicznego wyraża stosunek ciśnienia statycznego w danym punkcie na powierzchni przegrody do ciśnienia dynamicznego wiatru (5) [6].

Znając te wartości oraz wartość podciśnienia lub nadciśnienia p_w w budynku, możemy określić różnicę ciśnień w poszczególnych otworach (6). Jeśli ciśnienie wewnątrz budynku jest mniejsze od ciśnienia na zewnątrz, korzystamy ze wzoru (7.1). W przeciwnym przypadku zastosowanie ma wzór (7.2).

Znając różnicę ciśnień w otworach wentylacyjnych spowodowaną siłami grawitacji oraz działaniem wiatru, można określić strumień powietrza wentylacyjnego. Należy jednak pamiętać o tym, aby był zachowany bilans ilości powietrza.

3. Obliczanie wentylacji w budynkach wielostrefowych

Istnieje wiele modeli do predykcji przepływu powietrza w budynku, które można podzielić na empiryczne, teoretyczne, sieciowe, strefowe czy CFD [7, 8, 9, 10]. Uproszczona forma opisu zjawiska w modelach empirycznych czy teoretycznych umożliwia stosunkowo szybkie, ale szacunkowe wyliczenie ilości powietrza wentylacyjnego. Można je stosować, podobnie jak modele empiryczne, do szacowania przepływu powietrza w budynkach jednostrefowych.

Modele sieciowe, strefowe czy też modele CFD dają możliwość predykcji przepływu w budynkach wielostrefowych. Okazuje się jednak, że literatura przedmiotu w tym zakresie jest dość znikoma. Przyczyna może tkwić w tym, że stosowanie tych technik w wentylacji naturalnej jest niezwykle czasochłonne.

Rozkład strumieni powietrza w poszczególnych otworach wentylacyjnych przedstawiony został na modelu fizycznym (rys. 3). Powietrze jest nawiewane do pomieszczenia przez otwory 1 oraz 4. Wywiew następuje otworami 2 oraz 3. Otwór 5 zlokalizowany

jest pomiędzy nawami, a przepływ następuje z nawy pierwszej do nawy drugiej.

Model matematyczny (8) zaprezentowano w formie układu równań opisujący ruch powietrza w budynku dwunawowym. Model ten służy do wyznaczenia ilości powietrza wentylacyjnego przepływającego przez poszczególne otwory z zachowaniem bilansu strumieni masowych. Za pomocą modelu wyznaczyć można również nadciśnienie lub podciśnienie występujące w poszczególnych nawach budynku.

4. Wyniki obliczeń oraz ich analiza

Do obliczeń strumienia powietrza oraz nadciśnienia w poszczególnych nawach budynku wykorzystano program Mathcad. Na podstawie opracowanego modelu dokonano obliczeń dla przykładowych danych.

Obliczenia wykonano dla trzech różnych prędkości wiatru oraz dwóch temperatur powietrza zewnętrznego. Na podstawie otrzymanych wyników można założyć, że opracowany model jest prawidłowy, ponieważ został zachowany bilans strumieni masowych ($m_1 = m_2 + m_3$ oraz $m_3 = m_4 + m_5$).

Dla temperatury zewnętrznej równej 5°C intensywność wymiany powietrza jest znacznie lepsza niż dla temperatury zewnętrznej równej 10°C . Wynika to z tego, że wartość strumieni masowych w poszczególnych otworach wentylacyjnych dla temperatury 5°C (rys. 4) jest większa od wartości strumieni masowych w otworach dla temperatury 10°C . Dzieje się tak, ponieważ przy niższej temperaturze zewnętrznej różnica gęstości powietrza wewnątrz oraz na zewnątrz budynku jest większa, co intensyfikuje wymianę powietrza. Jak wynika z rysunków 4 i 5, zmieniająca się wartość prędkości wiatru nie wpływa znacząco na ilość powietrza wentylacyjnego.

Nadciśnienie panujące wewnątrz budynku dla każdej z naw zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości wiatru oraz temperatury (rys. 6). Przyjmuje ono większe wartości dla temperatury zewnętrznej 5°C , co spowodowane jest większą różnicą ciśnień wewnątrz oraz na zewnątrz budynku. Założyć można, że wraz z dalszym wzrostem prędkości wiatru, w budynku powstanie podciśnienie, co prowadzić może do zmiany pracy otworów wentylacyjnych z nawiewnych na wywiewne. Ponieważ prędkość wiatru jak i temperatury ulegają ciągłym zmianom, ciężko wyznaczyć optymalną powierzchnię otworów wentylacyjnych. Na uwagę zasługuje fakt, że wartość ciśnienia wewnątrz budynku nie wpływa znacząco na ilość powietrza wentylacyjnego.

5. Wnioski

Zagadnienia związane z procesami aerodynamicznymi w budynku nie leżą w zainteresowaniu architektów i projektantów, którzy sprowadzają problem do instalacji klimatyzatorów. Działania podejmowane na rzecz ochrony środowiska w celu obniżenia zapotrzebowania na energię zwiększają zainteresowanie wentylacją naturalną.

Powód, dla którego podjęto próbę badania procesów aerodynamicznych z wentylacją naturalną, wiąże się z problemami związanymi z rozdziałem powietrza w różnych strefach budynku. Obliczanie wentylacji naturalnej dla budynków wielostrefowych, np. wielonawowych jest procesem bardzo złożonym, opartym na licznych założeniach. Brak jest modeli pozwalających na dokładne obliczenie aerodynamiki wentylacji w takich obiektach. Ilość powietrza ustalana jest na podstawie obciążenia cieplnego. Zakładany jest rozdział powietrza oraz wartość podciśnienia lub nadciśnienia w poszczególnych nawach. Założenia te są przypuszczalne w zależności od przeznaczenia budynku, co może prowadzić do błędnych wyników obliczeń.