

**Dorota Bzowska**

**DYNAMIKA PROCESÓW WYMIANY CIEPŁA  
I NATURALNEJ WYMIANY POWIETRZA  
W BUDYNKACH O RÓŻNEJ STRUKTURZE  
MATERIAŁOWEJ PRZEGRÓD**



INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

WARSZAWA 2007

ISSN 0208-5658  
ISBN 978-83-89687-15-9

Redaktor Naczelny:  
doc. dr hab. Zbigniew Kotulski

Recenzent:  
prof. dr hab. Halina Koczyk

Praca wpłynęła do Redakcji 10 września 2006 r.

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład: 100 egz., Ark. druk.: 13,25

Oddano do druku w lipcu 2007 roku

---

Druk i oprawa: Drukarnia Braci Grodzickich, Piaseczno, ul. Geodetów 47a

## Streszczenie

Praca dotyczy nieustalonych procesów wymiany ciepła i naturalnej wymiany powietrza w obiektach budowlanych o różnej strukturze materiałowej przegród zewnętrznych, której cel i zakres omawiany jest w rozdziale 1.

W praktyce inżynierskiej ilości powietrza wentylacyjnego wyznaczane są z prostych zależności, które wyprowadzono m.in. eksperymentalnie. Opisują one stany ustalone wymiany powietrza. Rozdział 2 zawiera przegląd literaturowy tych prostych modeli oraz stan badań nad stosowaniem w budynkach systemu wentylacji hybrydowej. Uzupełnieniem rozdziału są modele wykorzystywane w zaawansowanych badaniach procesu wymian powietrza oraz próby badania bezpośredniego wpływu struktury materiałowej przegród budynku na komfort cieplny pomieszczenia.

Początkowo, polem zainteresowania badaczy były procesy wymiany ciepła w budynkach, przy stałym strumieniu objętości powietrza wentylacyjnego. Badania te prowadzone były głównie w kontekście zapotrzebowania energii na cele grzewcze. Natomiast wymiana powietrza, w budynkach z naturalną wentylacją, przebiega ze zmienną intensywnością, gdyż podlega dobowym wahaniom parametrów klimatu. Stąd też modelowanie omawianego procesu wymaga rzetelnych danych klimatycznych dla danej lokalizacji. Niezbędna więc była identyfikacja danych meteorologicznych, w tym także prędkości i kierunku wiatru. Te informacje zawiera rozdział 3.

Pełny zestaw uśrednionych, po roku i miesiącu, danych klimatycznych, w tym wiatru gradientowego, pozwolił prześledzić zmiany w ilości i charakterze przepływu powietrza na poszczególnych piętrach budynku, który wyposażono w system wentylacji grawitacyjnej – rozdział 4.

W rozdziale 5 omówiono i przetestowano modele naturalnej wentylacji w budynkach jedno i dwustrefowych, które stworzyli Y. Li i A. Delsante. Oba modele, na potrzeby przedstawianej pracy, zostały zmodyfikowane. Modyfikacja polegała na aproksymowaniu uzyskanych rozwiązań funkcjami harmonicznymi parametrów klimatu.

W modelu matematycznym budynku jednostrefowego przepływ powietrza wentylacyjnego opisany jest równaniem trzeciego stopnia. Wynikiem rozwiązania analitycznego jest jeden pierwiastek rzeczywisty. Do rozwiązania równań w budynku dwustrefowym wykorzystano własny algorytm numeryczny. Rozwiązanie równań tworzących model budynku dwustrefowego, przy przyjętych warunkach początkowych, umożliwia otrzymanie wielu pierwiastków rzeczywistych. Wyniki rozwiązania tworzą wówczas histerezę przepływu.

Poprawne wyznaczenie ilości powietrza wentylacyjnego, przepływającego przez budynek, nie jest możliwe bez jednoczesnego modelowania procesu wymiany

ciepła pomiędzy budynkiem a jego otoczeniem. Doświadczenie, nabyte we wcześniejszych pracach o tematyce ciepłno-przepływowej, pozwoliło na stworzenie własnego modelu, który opisuje te procesy w obiekcie z naturalną wentylacją. Model jednowymiarowej, nieustalanej wymiany ciepła i naturalnej wymiany powietrza przez budynek, powstał przy założeniu, że badane procesy są wynikiem zmiennych w czasie doby, a stałych – w miesiącu oddziaływań parametrów klimatu. W celu badania tej relacji zostały stworzone autorskie programy komputerowe dla obiektów: jednostrefowego i dwustrefowego, które umożliwiają jednoczesne modelowanie obu tych procesów, tj. zarówno wymiany ciepła, jak i powietrza wentylacyjnego.

Wynikiem symulacji są przebiegi: strumienia objętości powietrza wentylacyjnego, temperatury we wnętrzu pomieszczenia, całkowitej akumulacji ciepła w całym obiekcie oraz poszczególnych przegrodach, strat i zysków ciepła przez ściany, strop i okna, przebiegi temperatury w poszczególnych warstwach ścian oraz strat ciepła do gruntu. Program umożliwia ponadto wizualizację niektórych z symulowanych wielkości, tj. temperatur w poszczególnych przegrodach budynku. Program jest prostym w obsłudze narzędziem, który pozwala wykazać różnice w dynamice ciepłno-przepływowej obiektów o różnej strukturze materiałowej ścian. Założenia oraz możliwości obliczeniowe programu zamieszczono w rozdziale 6.

W rozdziale 7 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dla pięciu budynków jednostrefowych i dwustrefowych o różnej strukturze materiałowej przegród zewnętrznych.

Symulowane numerycznie procesy ciepłno-przepływowe, w analizowanych budynkach, wykonywane były przy różnych wymuszeniach zewnętrznych. Budynek podlegał oddziaływaniu całkowitego promieniowania słonecznego lub tylko rozproszonego. Symulowano procesy bez udziału wiatru, a także te, które uwzględniały jego działanie na budynek w dwóch trybach: wspomagającym przepływ powietrza wentylacyjnego oraz tłumiącym lub odwracającym. We wszystkich symulacjach składową wymuszenia była temperatura otoczenia.

Dla budynków, o skrajnej pojemności cieplnej przegród zewnętrznych, wykonano obliczenia przy różnej powierzchni i orientacji okien. Symulacje numeryczne, we wszystkich typach budynków, przeprowadzono zarówno, z wewnętrzną masą akumulującą ciepło, jak i bez niej.

Badanie procesów ciepłno-przepływowych przeprowadzono dla lipca, rozszerzając materiał porównawczy o maj i wrzesień dla budynku o konstrukcji szkieletowej zaizolowanego wełną mineralną i po termomodernizacji.

W rozdziale 8 przeanalizowano różnice w wynikach obliczeń otrzymanych z rozwiązania równań bilansowych zmodyfikowanego modelu Li, Delsante i symulacji autorskiego programu komputerowego.

Rozdział 9 podsumowuje wyniki badań i podaje wnioski.

Praca zawiera dodatki do rozdziałów drugiego, trzeciego i szóstego.

Przeprowadzone symulacje pozwoliły na wyciągnięcie istotnych wniosków dotyczących zagadnienia pomijanego przez współczesnych projektantów wolnostojących obiektów budowlanych. Obecnie zwracają oni uwagę na okresy roku, w których istotnym czynnikiem utrzymania ergonomicznych warunków w pomieszcze-

niach jest minimalizacja strat ciepła do otoczenia poprzez konstruowanie ścian domów o bardzo wysokiej izolacyjności cieplnej, konstruowanie szczelnych okien, ograniczających w znacznym stopniu przepływ powietrza wentylacyjnego. Budynki takie pozwalają na utrzymywanie poprawnych temperatur w okresach chłodu, przy obniżonym zapotrzebowaniu na energię, w stosunku do budynków tradycyjnych. W okresie letnim, by sprostać oczekiwaniom mieszkańców, staje się często niezbędne instalowanie energochłonnych klimatyzatorów. W okresach przejściowych budynki te wymagają dogrzewania, gdyż ściany w minimalnym stopniu absorbują zyski słoneczne. Nie są to jedyne problemy, jakie występują w tego typu budynkach. Można zatem stwierdzić, że są to budynki tylko sezonowo energooszczędne.



## Spis treści

|   |    |
|---|----|
| Streszczenie.....   | 3  |
| Wykaz ważniejszych oznaczeń.....  | 9  |
| 1. Przedmiot, cel i zakres pracy.....   | 11 |
| 2. Modele szacowania naturalnej wymiany powietrza, przegląd literatury.....   | 17 |
| 2.1. Siły wymuszające naturalny przepływ powietrza przez budynek.....   | 17 |
| 2.2. Przegląd modeli matematycznych do predykcji naturalnej wymiany powietrza wentylacyjnego.....                                       | 21 |
| 2.2.1. Modele empiryczne.....   | 21 |
| 2.2.2. Modele teoretyczne.....  | 24 |
| 2.2.3. Modele sieciowe.....   | 25 |
| 2.2.4. Modele strefowe.....   | 26 |
| 2.2.5. Symulacje CFD.....   | 26 |
| 2.3. Badania procesów ciepłno-przepływowych w budynkach z naturalną wentylacją w literaturze przedmiotu.....                            | 28 |
| 3. Parametry klimatu.....   | 31 |
| 3.1. Promieniowanie słoneczne i temperatura otoczenia.....  | 31 |
| 3.2. Identyfikacja prędkości i kierunku wiatru.....   | 35 |
| 3.2.1. Modelowanie wiatru.....  | 36 |
| 3.2.2. Składowa deterministyczna prędkości i kierunku wiatru.....   | 39 |
| 3.2.3. Relacje potęgowe składowych funkcji harmonicznej.....  | 44 |
| 4. Wpływ wiatru gradientowego na strumień objętości powietrza wentylacyjnego.....   | 47 |
| 4.1. Założenia modelowe.....  | 47 |
| 4.2. Wyniki obliczeń.....   | 49 |
| 5. Uproszczony model naturalnej wymiany powietrza w jednostrefowych i dwustrefowych obiektach budowlanych. Rozwiązanie analityczne..... | 55 |
| 5.1. Wprowadzenie.....  | 55 |
| 5.2. Założenia modelowe dla obiektu jednostrefowego.....  | 58 |
| 5.2.1. Wpływ wiatru na strumień objętości wymienianego powietrza w budynku jednostrefowym.....  | 61 |
| 5.2.1a. Wiatr wspomagający przepływ powietrza wentylacyjnego.....   | 63 |
| 5.2.1b. Wiatr przeciwny – tłumiący lub odwracający kierunek przepływu powietrza wentylacyjnego.....                                     | 64 |
| 5.3. Założenia modelowe dla obiektu dwustrefowego.....  | 66 |
| 5.4. Charakterystyka testowanych obiektów.....  | 70 |
| 5.5. Wynik obliczeń w obiekcie jednostrefowym.....  | 71 |
| 5.6. Wynik obliczeń w obiekcie dwustrefowym.....  | 76 |
| 5.6.1. Przepływ powietrza wentylacyjnego intensyfikowany wiatrem.....   | 76 |
| 5.6.2. Przepływ powietrza wentylacyjnego skierowany do góry, tłumiony wiatrem przeciwnym.....   | 78 |
| 5.6.3. Przepływ powietrza wentylacyjnego skierowany ku dołowi, wywołany wiatrem przeciwnym.....   | 79 |
| 5.7. Wielokrotne miejsca zerowe funkcji opisującej model dwustrefowy – histereza przepływu.....   | 82 |
| 5.8. Podsumowanie.....  | 85 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 6.     | Nieustalony, jednowymiarowy przepływ ciepła oraz powietrza w obiektach o różnej strukturze materiałowej przegród. Założenia do autorskiego programu komputerowego..... | 87  |
| 6.1.   | Warunki równowagi termodynamicznej budynku.....  | 87  |
| 6.2.   | Założenia modelowe, zakres i możliwości autorskiego programu komputerowego.....  | 90  |
| 6.2.1. | Wymiana ciepła.....  | 92  |
| 6.2.2. | Promieniowanie słoneczne.....  | 97  |
| 6.2.3. | Wymiana powietrza wentylacyjnego.....  | 99  |
| 6.3.   | Metodyka obliczeń numerycznych.....  | 99  |
| 6.4.   | Charakterystyka analizowanych budynków.....  | 102 |
| 7.     | Nieustalony przepływ ciepła i powietrza w obiektach jedno- i dwustrefowych z naturalną wentylacją – o różnej strukturze materiałowej przegród.....                     | 111 |
| 7.1.   | Nieustalony przepływ ciepła i powietrza w obiektach jednostrefowych, z pominięciem oddziaływania wiatru.....   | 111 |
| 7.1.1. | Energetyczne zyski słoneczne w analizowanych budynków.....   | 123 |
| 7.1.2. | Podsumowanie.....  | 125 |
| 7.2.   | Nieustalony przepływ ciepła i powietrza w obiektach jednostrefowych, przy pełnym wymuszeniu zewnętrznym.....   | 126 |
| 7.2.1. | Nieustalona wymiana ciepła i powietrza w lipcu.....  | 127 |
| 7.2.2. | Całkowita akumulacja ciepła w budynkach nr 1–5.....  | 141 |
| 7.2.3. | Nieustalona, wymiana ciepła i powietrza w budynku w maju i wrześniu.....   | 146 |
| 7.2.4. | Podsumowanie.....  | 151 |
| 7.3.   | Nieustalony przepływ ciepła i powietrza w obiektach dwustrefowych, przy pełnym wymuszeniu zewnętrznym.....   | 152 |
| 7.3.1. | Budynek nr 1.....  | 153 |
| 7.3.2. | Budynek nr 2.....  | 158 |
| 7.3.3. | Budynek nr 3.....  | 161 |
| 7.3.4. | Budynek nr 4.....  | 163 |
| 7.3.5. | Budynek nr 5.....  | 166 |
| 7.3.6. | Podsumowanie.....  | 169 |
| 8.     | Analiza wyników obliczeń, uzyskanych z rozwiązania modeli Li, Delsante i symulacji numerycznych w budynku jedno- i dwustrefowym, z naturalną wentylacją.....           | 171 |
| 8.1.   | Charakterystyka badań.....   | 171 |
| 8.2.   | Wyniki obliczeń w budynku jednostrefowym.....  | 173 |
| 8.3.   | Podsumowanie wyników badań w budynku jednostrefowym.....   | 180 |
| 8.4.   | Wyniki obliczeń w budynku dwustrefowym.....  | 182 |
| 8.5.   | Podsumowanie wyników badań w budynku dwustrefowym.....   | 195 |
| 9.     | Podsumowanie i wnioski.....  | 197 |
|        | Dodatek 2.1.....   | 203 |
|        | Dodatek 3.1.....   | 204 |
|        | Dodatek 6.1.....   | 206 |
|        | Literatura.....  | 207 |



## Wykaz ważniejszych oznaczeń

## Indeksy dolne

- 1 – strefa pierwsza, dolna budynku  
 2 – strefa druga, górna budynku  
 i – dot. środowiska wewnętrznego budynku  
 o – dot. otoczenia zewnętrznego budynku

## Wykaz oznaczeń

|                    |  |  |
|--------------------|--|--|
| A                  | – powierzchnia ściany  | [m <sup>2</sup> ]                      |
| A <sub>ef</sub>    | – efektywna powierzchnia wymiany powietrza wentyl.   | [m <sup>2</sup> ]                      |
| A <sub>ok</sub>    | – powierzchnia okna  | [m <sup>2</sup> ]                      |
| B                  | – wypór termiczny  | [m <sup>4</sup> ·s <sup>-3</sup> ]     |
| C <sub>d</sub>     | – współczynnik zwężenia strugi jednakowy dla otworu w zawietrznej przegrodzie jak i nawietrznej fasadzie budynku | [-]                                    |
| C <sub>d1/2</sub>  | – współczynnik zwężenia strugi powietrza przepływającej przez otwór w nawietrznej / zawietrznej przegrodzie      | [-]                                    |
| C <sub>p 1/2</sub> | – współczynnik odzysku ciśnienia na nawietrznej / zawietrznej przegrodzie budynku                                | [-]                                    |
| c <sub>p</sub>     | – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu  | [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] |
| d                  | – odległość pomiędzy osią symetrii otworu wentylacyjnego a podłogą lub sufitem                                   | [m]                                    |
| E                  | – sumaryczna moc cieplna pozyskiwana przez budynek (wewnętrzne źródła ciepła oraz słońce)                        | [W]                                    |
| E <sub>i</sub>     | – moc wewnętrznych źródeł ciepła w budynku   | [W]                                    |
| E <sub>s</sub>     | – moc cieplna pochodząca z promieniowania słonecznego, którą budynek pozyskuje jedynie za pośrednictwem okien    | [W]                                    |
| f <sub>p</sub>     | – udział promieniowania rozproszonego w całkowitym promieniowaniu słonecznym                                     | [-]                                    |
| g                  | – przyspieszenie ziemskie  | [m·s <sup>-2</sup> ]                   |
| h                  | – odległość pomiędzy osiami otworu wentylacyjnego dolnego i górnego  | [m]                                    |
| h <sub>i/o</sub>   | – współczynnik przejmowania ciepła na wewnętrznej / zewnętrznej powierzchni przegrody                            | [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]  |
| N                  | – wykładnik potęgowy Suttona   | [-]                                    |
| n                  | – liczba wymian powietrza wentylacyjnego w jednostce czasu   | [w·h <sup>-1</sup> ]                   |
| p                  | – ciśnienie  | [N·m <sup>-2</sup> ]                   |
| Q                  | – strumień ciepła  | [W]                                    |
| q <sub>s</sub>     | – gęstość strumienia ciepła  | [W·m <sup>-2</sup> ]                   |
| T                  | – temperatura  | [°C], [K]                              |
| U                  | – współczynnik przenikania ciepła przez przegrodę  | [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]  |
| V                  | – objętość   | [m <sup>3</sup> ]                      |

|           |   |                                    |
|-----------|---|------------------------------------|
| $\dot{V}$ | – strumień objętości powietrza wentylacyjnego | $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ |
| $v$       | – prędkość wiatru kierunkowego                | $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$   |

### Symbole greckie

|                |  |  |
|----------------|--|--|
| $\alpha_{1/2}$ | – strumień objętości powietrza wentylacyjnego generowany wyporem termicznym w pierwszej (dolnej) / drugiej (górnej) strefie budynku              | $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$                   |
| $\alpha_{g/d}$ | – strumień objętości powietrza wentylacyjnego generowany wyporem termicznym z przepływem skierowanym ku górze / do dolnego otworu wentylacyjnego | $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$                   |
| $\alpha_s$     | – absorpcyjność ściany dla widma promieniowania słonecznego  | $[-]$  |
| $\beta$        | – strumień objętości powietrza wentylacyjnego zależny od strat ciepła przez przegrody  | $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$                   |
| $\Delta$       | – przyrost wartości  |  |
| $\rho$         | – gęstość  | $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$                    |
| $\rho_r$       | – współczynnik refleksyjności podłoża  | $[-]$  |
| $\lambda$      | – przewodność cieplna materiału  | $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ |
| $\tau$         | – czas   | $[\text{s}]$   |
| $\tau_{ok}$    | – współczynnik przepuszczalności promieniowania słonecznego  | $[-]$  |

## 1. Przedmiot, cel i zakres pracy

Przedmiotem pracy są badania nieustalonych procesów cieplno-przepływowch w budynkach z naturalną wentylacją, których przegrody zewnętrzne charakteryzują się różną strukturą materiałową. Celem zaś – wykazanie wpływu struktury materiałowej przegród zewnętrznych obiektów budowlanych na przebieg naturalnej wymiany powietrza wentylacyjnego oraz temperatury wewnętrznej. Do wykazania powyższej zależności zaproponowano metodologię badania procesu wymiany powietrza w skojarzeniu z procesem wymiany ciepła pomiędzy budynkiem a otaczającym go środowiskiem naturalnym. Narzędziem, umożliwiającym badanie tych relacji, jest autorski program komputerowy. Program ten jednocześnie symuluje procesy wymiany ciepła w budynku, jak i naturalnej wymiany powietrza wentylacyjnego. Wynikiem symulacji są nie tylko: przebiegi dzienne temperatury we wnętrzu pomieszczenia i wymiany powietrza, ale także całkowita akumulacja ciepła w obiekcie, straty i zyski ciepła przez ściany, strop i okna, straty ciepła do gruntu, oraz przebiegi temperatury w poszczególnych warstwach ścian. Dobowe przebiegi temperatury w przegrodach, jak i akumulacji ciepła, są źródłem informacji o intensywności procesów zachodzących we wnętrzu budynku.

Dodatkowym zadaniem pracy było wykazanie celowości współdziałania, w naszym klimacie, wentylacji naturalnej z wentylacją mechaniczną – jak to ma zastosowanie w Skandynawii czy na Wyspach Brytyjskich. Takie rozwiązanie jest skutkiem rozpatrywania energooszczędności całorocznej, a nie tylko w sezonie grzewczym.

Jako narzędzie wspomagające prace projektanta może służyć komputerowy program autorski. Łatwość wymiany w programie zbiorów danych klimatycznych, materiałowych, zmiany gabarytów i orientacji przegród, mocy wewnętrznych źródeł ciepła, selekcji wymuszenia zewnętrznego itd. – umożliwia szybkie przeprowadzenie szeregu symulacji. Zakres informacji uzyskanych tą drogą rozszerza wiedzę projektanta i wyrabia intuicję, a tym samym ułatwia dobór wstępnych, ale poprawnych założeń projektowych. Ich zmiana, w trakcie dalszej pracy projektowej, nie musi przynosić pożądaných efektów lub jest bardzo trudna do zrealizowania.

Wentylacja naturalna wykorzystuje naturalne źródła energii dostarczane przez wiatr i słońce. Są one ogólnie dostępne i nie ulegają wyczerpaniu. Jednocześnie niezwykle trudno poddają się kontroli i zarządzaniu. Przepływ powietrza przez budynek, wywołowany różnicą temperatur i wiatrem, zachodzi pomiędzy oknem a kratką połączoną z kanałem wentylacyjnym. Wiatr jest często czynnikiem dominującym w kształtowaniu tego procesu, ale jednak – w wielu przypadkach – naturalna wentylacja pomieszczeń wymuszana jest tylko różnicą gęstości powietrza w – i poza budynkiem. Obecnie, w systemie wentylacji naturalnej, coraz częściej regulowane otwory wentylacyjne zastępują proste kratki wentylacyjne.

Wyróżniane są dwie podstawowe formy wentylacji naturalnej: pierwsza, przy której przepływ powietrza jest turbulentny i następuje zmieszanie powietrza zewnętrznego z tym z pomieszczenia. Proces ten wyrównuje temperaturę powietrza w pomieszczeniu. Druga forma wentylacji, tzw. waporowa, zachodzi w sytuacji, kiedy zużyte, cieplejsze powietrze wypychane jest ku otworom wylotowym poprzez powietrze cięższe, dopływające z zewnątrz. W tym wypadku ustala się silna stratyfikacja temperatury ze strefą rozdziału, ułożoną pomiędzy powietrzem doprowadzonym a zużytym. Taka forma przepływu scharakteryzowanego liczbą Frouda o wartości poniżej 1, jest także obserwowana przy udziale wiatru [1, 25, 66, 78].

Badania nad procesami naturalnej wentylacji, w odniesieniu do wiatru, były i są bardzo intensywnie prowadzone w tunelach aerodynamicznych. Wyniki badań modelowych odnoszą się w zasadzie bezpośrednio do budynków rzeczywistych. Stąd też wiadomo, że wymiana powietrza jest funkcją prędkości wiatru. Jednak badania skierowane są w głównej mierze na wentylację wywołowaną różnicą gęstości powietrza, gdyż gorące i bezwietrzne dni prowadzą – w budynkach z naturalną wymianą powietrza – do najbardziej niekorzystnych warunków cieplno-wilgotnościowych. Jeśli takie sytuacje występują sporadycznie, to można i warto je zaakceptować unikając tym samym ponoszenia kosztów instalacji i eksploatacji bardziej wyrafinowanych systemów wentylacyjnych. Można też stosować rozwiązanie w postaci skojarzonego systemu wentylacji naturalnej i mechanicznej. Jednak rzeczywiste warunki, w jakich funkcjonuje naturalna wentylacja, wymagają badań nad wymianą powietrza wywołowaną zarówno różnicą temperatur, jak i wiatrem.

Naturalny przepływ powietrza przez budynek definiowany jest nie tylko jego intensywnością. Dlatego też prowadzone są prace nad daleko bardziej złożonym zagadnieniem, którym jest mechanika przepływu powietrza w pomieszczeniu. Proces ten, zachodzący tylko w pojedynczym pomieszczeniu, może być i zazwyczaj jest bardzo złożony [11]. Badania, w tym modelowe, nie mają długiej historii [14, 41, 55, 65, 66, 77, 88]. Natomiast kompleksowe modelowanie przepływów w pomieszczeniach, sądząc po literaturze, jeszcze się nie rozpoczęło. W rzeczywistości przepływ powietrza odbywa się w połączonych wzajemnie przestrzeniach, a prowadzone badania dotyczą procesów zachodzących w pojedynczej przestrzeni. Poznanie i zrozumienie tego zjawiska, odnoszącego się do wyizolowanego z budynku pomieszczenia, stanowi fundament dalszych rozbudowanych o nowe zagadnienia eksperymentów.

Proces dynamiki wymiany powietrza wentylacyjnego nie jest procesem tak dobrze poznany, jak transport ciepła i dlatego też stanowi wyzwanie dla badaczy do stworzenia sprawnego systemu wentylacji naturalnej.

Wydaje się, że obecnie wnoszone budynki, z racji otwartych przestrzeni i dużego przeszklenia, są obiektami sprzyjającymi stosowaniu tego systemu. Nawet budynki w chłodnym klimacie charakteryzują się niską przepuszczalnością powietrza. Obecnie zadaniem projektanta jest nie tylko zapewnienie sprawnej wymiany powietrza wentylacyjnego, ale także, szczególnie w okresie letnim, usuwanie nadmiaru ciepła z pomieszczenia.

Człowiek zużywa średnio do oddychania  $7,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  powietrza, natomiast usunięcie nadmiaru ciepła wymaga zwielokrotnienia tej wartości. Świadomość omawianego problemu stawia przed projektantami zadanie zarówno rzetelnego zrozumienia zasad wentylacji, jak i nabrania biegłości i wyczucia także w innych zakresach projektowania budynków.

Niezależnie od stopnia zawansowania prac nad systemami wymiany powietrza, poprawnie wykonany, w myśl zasad fizyki budowli, projekt obiektu powinien spełniać kryteria: właściwej izolacyjności cieplnej przegród budowlanych, adekwatnego do potrzeb systemu ogrzewania i systemu wymiany powietrza, dostępu światła dziennego oraz regulowanej dostępności promieniowania słonecznego. Przedstawione powyżej kryteria kształtują przyjazne dla użytkowników warunki w pomieszczeniu, a mianowicie akceptowaną w danej sytuacji temperaturę wewnętrzną oraz jakość powietrza. Spełnianie tych wymogów projektowych ma wynikać z wiedzy, praktyki inżynierskiej oraz intuicji projektanta.

Natomiast od czasu kryzysu energetycznego uwaga projektantów skupiła się na budynkach energooszczędnych. Preferowanym jest więc budynek szczelny, o zredukowanej infiltracji powietrza i o dużym oporze cieplnym przegród zewnętrznych, czyli niskim zapotrzebowaniu ciepła na ogrzewanie. To jednoznaczne kryterium powoduje zaniedbywanie bądź pomijanie wymogów higienicznych, czy też wręcz zdrowotnych użytkowników, a także utrudnia utrzymanie poprawnej kondycji materiałowej budynku. Rośnie jednak świadomość zagrożeń wynikających ze złej jakości powietrza. Stąd też przekonanie do konieczności zastępowania wentylacji naturalnej mechaniczną, w tym także z odzyskiem ciepła. Jednak z racji przyjętych obecnie zasad polityki energetycznych system ten zamieniany jest na mechaniczno-naturalny, który przyjął nazwę hybrydowego.

Poszukiwanie efektywnego wykorzystania energii, w eksploatacji obiektów budowlanych, skierowało uwagę projektantów zarówno na pozyskiwanie energii ze środowiska naturalnego, jak i wymagania stawiane dynamicznym i izolacyjnym właściwościom przegród budowlanych. Stosowanie przegród z wyodrębnionym lekkim materiałem izolacyjnym, o dużym oporze cieplnym i zredukowanej masie, obniża pozornie zapotrzebowanie na ciepło. Potrzeby energetyczne budynków, o niskiej akumulacji ciepła i wysokim oporze przenikania ciepła przez przegrody zewnętrzne, związane z wymianą powietrza wentylacyjnego lub usunięciem nadmiaru ciepła w okresie letnim, wzrastają powyżej 50% w stosunku do budynków tradycyjnych. Kryterium izolacyjności przegród budowlanych nie jest jedynym warunkiem określającym energochłonność obiektu. Istnieje więc potrzeba poszukiwania najkorzystniejszych relacji pomiędzy pojemnością cieplną przegród budowlanych i ich izolacyjnością a zdrowym mikroklimatem pomieszczeń.

Nowe rozwiązania, zarówno w ogrzewnictwie jak i wentylacji, muszą prowadzić nie tylko do spadku zapotrzebowania na energię, ale także gwarantować kształtowanie właściwego środowiska wewnętrznego. Warto zauważyć, że działania skutkujące spadkiem zużycia energii na cele grzewcze w budynkach, toczą się dwuetapowo. Pierwszy etap wynika z zastosowania w budownictwie nowych technologii, stworzonych dla stosowania materiałów budowlanych o bardzo niskiej wartości

współczynnika przewodności ciepła. Drugi wynika z działania użytkowników, którzy przy zamontowanych podzielnikach kosztów i szczelnych oknach obniżają temperaturę zasilania w instalacji c.o. Skutkiem aktywności mieszkańców jest spadek temperatury wewnętrznej, co przy braku efektywnej wentylacji prowadzi do kondensacji pary wodnej na wewnętrznych przegrodach budynku. Konsekwencją tego procesu jest nie tylko destrukcja materiału budowlanego, ale także organizmów użytkowników. Te ujemne zjawiska zaczęto zauważać w latach 80. Z kolei, w obiektach klimatyzowanych może wystąpić tzw. syndrom chorego budynku. Zjawisko to pojawia się wówczas, kiedy instalacje nawiewno-wywiewne umożliwiają infekowanie zarazkami chorobotwórczymi użytkowników obiektu. W tej sytuacji zdano sobie sprawę, że zadaniem budynku jest nie tylko sprawnie ochraniać człowieka przed niesprzyjającymi warunkami otoczenia zewnętrznego (o czym człowiek wiedział już od wybudowania pierwszego szałas), ale także wytwarzać zdrowe środowisko egzystencji. Spełnianie obu tych warunków musi współdziałać z efektywnym zużyciem energii, a więc prosta redukcja energii na cele grzewcze budynku nie może być wartością samą w sobie.

Lata 90. zapoczątkowały trend, który niwelował ujemne skutki postrzegania budynku jedynie w aspekcie budynku niskoenergetycznego w trakcie sezonu grzewczego. Zauważono, że obiekt powinien być zintegrowany z otoczeniem, by móc wykorzystywać naturalne procesy zachodzące w środowisku i tym samym wspomagać użytkowe funkcje budynku. Integracja ze środowiskiem zewnętrznym zwiększa szansę na to by budynek był sprawny energetycznie. Integracja rozpoczyna się od lokalizacji działki budowlanej, tak w sensie klimatycznym, jak i jej konfiguracji z otoczeniem. Możliwe staje się m.in. pełne wykorzystanie dziennego oświetlenia, stosowanie helioaktywnych i heliopasywnych rozwiązań, a także kształtowanie zdrowego mikroklimatu pomieszczeń poprzez wykorzystanie naturalnej wentylacji.

Trendy w architekturze preferują duże, dobrze oświetlone przestrzenie. Nowe technologie produkcji szkła okiennego pozwalają otrzymywać produkt bardzo wysokiej jakości. Wartość współczynnika przenikania ciepła dla okien zredukowano obecnie poniżej  $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Takie szyby są drogie, ale dostępne na rynku. Dodatkowo, postęp w samej strukturze projektowej, instalacyjnej i technologicznej budownictwa skłania do szerszego wykorzystywania szkła o obniżonej wartości współczynnika przenikania ciepła. Przeszkłone, atrakcyjne ze względów estetycznych i psychologicznych obiekty, znajdują uznanie u klientów, chociaż utrzymanie w nich komfortu cieplnego jest trudne. Dostępność światła dziennego, oraz możliwość pozyskiwania energii słonecznej, obniża tylko w niektórych porach roku koszty utrzymania obiektu.

Źródła podają, że roczny wskaźnik zużycia energii, w budynkach wzniesionych przed rokiem 1986, waha się pomiędzy  $240\text{--}280 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ , w latach 1986–1992 obejmuje zakres od 160 do  $200 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ , a we wznoszonych obecnie od 120 do  $160 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$  [99]. Wysiłki inżynierów zmierzają do jeszcze większego obniżenia zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Poważną wadą budynków energooszczędnych jest to, że w dalszym ciągu rzadko zapewniają poprawną wymianę powie-

trza. W pracy nie rozpatruje się budynków pasywnych, których energochłonność jest bardzo niska i wynosi  $10 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ , a wymianę powietrza w tych obiektach zapewnia zautomatyzowany system wentylacji mechanicznej.

Występowanie uciążliwych warunków bytowania w budynkach z naturalną wentylacją może wynikać z faktu, że projektanci nie wykazują się pełnym zrozumieniem współzależności zagadnień związanych z lokalizacją, bryłą, strukturą materiałową budynku, uwarunkowaniami klimatycznymi oraz jego warunkami eksploatacyjnymi. W działaniach skoncentrowanych na optymalizacji parametrów we wnętrzu budynku, a w szczególności temperatury, proponuje się wymuszoną wymianę powietrza. Brak alternatywy wynika z faktu, że na obecnym etapie wiedzy o mechanice przepływu powietrza w pomieszczeniach nie jesteśmy w stanie zaprojektować sprawnego, całorocznego systemu wentylacji naturalnej.

Świat w dalszym ciągu poszukuje sposobów ograniczenia zużycia energii. Walczy też z zanieczyszczeniami środowiska, do których zaliczają się produkty uboczne, powstające w procesie wytwarzania energii. Znane są przykłady miast, w których pracująca klimatyzacja wyczerpuje możliwości przesyłu mocy sieciami wysokiego napięcia. Z kolei, zarówno miejsca pracy, budynki handlowe, jak i mieszkalne nasycone są coraz większą ilością urządzeń elektronicznych zasilanych z sieci. Istnieje więc wiele powodów, dla których rozbudziło się już wielkie zainteresowanie systemami naturalnej wentylacji. Z jednej strony jest to ochrona naturalnego środowiska człowieka, z drugiej – poprawa jakości powietrza dostarczanego tym systemem.





## 2. Modele szacowania naturalnej wymiany powietrza, przegląd literatury

### 2.1. Siły wymuszające naturalny przepływ powietrza przez budynek

Wymiana powietrza w budynkach może odbywać się w wyniku wentylacji wymuszonej i naturalnej. W przypadku wentylacji wymuszonej, tj. mechanicznej, strumień powietrza wentylacyjnego dostarczany jest do budynku przy pomocy wentylatorów i rozprowadzany przez system rozdziału powietrza do poszczególnych stref. Wymiana powietrza przy wentylacji naturalnej odbywa się przez okna i drzwi oraz zaprojektowane otwory wentylacyjne. Proces ten jest wynikiem ciśnień generowanych przez napływający na budynek wiatr oraz spowodowany różnicą gęstości powietrza zewnętrznego i wewnętrznego. Naturalny przepływ powietrza przez budynek, mimo że zachodzi w wyniku działania parametrów klimatycznych, jest przepływem zamierzonym. Istnieje także niekontrolowany i nie zamierzony przepływ powietrza przez budynek. Przepływ ten wywołany jest tymi samymi czynnikami, tj. wiatrem i różnicą gęstości. Jest to zjawisko infiltracji powietrza przez szczeliny okienne i mikropeknięcia w przegrodach budynku.

Wymiana powietrza, zachodząca w budynku na drodze od otworu dopływowego do odpływowego, podlega rygorom prawa zachowania masy, jednak różnica gęstości pomiędzy powietrzem zewnętrznym a wewnętrznym jest na tyle niewielka, że może być w obliczeniach zaniedbywana. Założenie to umożliwia obliczanie strumienia objętości powietrza w miejsce strumienia masy. Dodatek 2.1 zawiera uzasadnienie przyjętego założenia.

Przepływ powietrza przez okna, otwory i szczeliny w obudowie budynku jest wynikiem powstawania w miejscu przepływu sumy spadku ciśnienia od wiatru i różnicy temperatur. Wiatr „zderzający się” z zewnętrzną przegrodą budynku generuje ciśnienie na jego zewnętrznej przegrodzie. Wartość tego ciśnienia zależy od kierunku napływu wiatru oraz lokalizacji budynku. Wielkość ciśnienia na przegrodzie zewnętrznej jest niezależna od ciśnienia panującego w środku budynku. W przypadku kiedy na budynek nie działają żadne inne siły poza naporem wiatru, powstają różnice ciśnień określone przez ciśnienie statyczne wewnątrz budynku.

W przypadku braku różnicy temperatur pomiędzy budynkiem i jego otoczeniem zewnętrznym, ciśnienia wewnątrz i na zewnątrz budynku są sobie równe i zmniejszają się liniowo wraz z wysokością. Spadek ciśnienia równy jest wtedy iloczynowi gęstości powietrza wewnętrznego, różnicy wysokości i przyspieszenia ziemskiego.

Ciśnienie, które wynika z oddziaływania wiatru na przegrodę nawietrzną, jest – w przeważających przypadkach – większe od ciśnienia statycznego panującego w środku budynku. Po stronie zawietrznej ma wartość ujemną. Na pozostałych przegrodach może być zarówno dodatnie jak ujemne, w zależności od kształtu bu-

dynku oraz kąta napływu wiatru. Ciśnienie na poszczególnych przegrodach budynku, przybiera wartości niemal proporcjonalne do prędkości niezakłóconego przepływu powietrza.

Prędkość (oraz kierunek) wiatru dla danej lokalizacji, dostępna z pomiarów w stacjach meteorologicznych, odpowiada zazwyczaj prędkości mierzonej na wysokości 10 m nad ziemią w terenie płaskim, często w pobliżu portów lotniczych, z powierzchnią gładką np. trawiastą. Dlatego też dane pomiarowe prędkości wiatru w postaci wieloletnich ciągów meteorologicznych poddawane są identyfikacji statystycznej. W wyniku tych zabiegów otrzymuje się, dla danej lokalizacji i kierunku, wartości uśrednione w czasie. Następnie, w zależności od chropowatości terenu, orientacji oraz umiejscowienia otworów wentylacyjnych nad poziomem gruntu, przelicza się wartości uśrednione na wartości adekwatne do wybranych warunków. Przy braku wiatru, w okresach, kiedy temperatura w budynku jest wyższa od temperatury otoczenia zewnętrznego, powietrze zewnętrzne przedostaje się przez dolne otwory i szczeliny do wnętrza obiektu. Przy odwróconych relacjach gęstości powietrza następuje przepływ odwrotny. W obecności wiatru kierunek przepływu powietrza przez budynek zależy od kierunku napływu wiatru i jego prędkości. Wiatr może intensyfikować przepływ powietrza, tłumić, kiedy nie pokonuje ciśnienia wynikającego z różnicy gęstości powietrza lub powodować także przepływ odwrotny.

Tak więc, strumień objętości powietrza wentylacyjnego jest funkcją spadku ciśnień i przy sumarycznym oddziaływaniu różnicy temperatur – ( $\Delta p_s$ ) i wiatru – ( $\Delta p_v$ ) i wyraża się poniższą zależnością [6, 7, 20]:

$$\dot{V} = C_d A \left( \frac{2}{\rho} (\Delta p_s + \Delta p_v) \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

Obliczanie wymiany powietrza wentylacyjnego wynika z rozwiązania bilansu masowego powietrza przepływającego przez budynek różnymi otworami. Powyższe wyrażenie, przy turbulentnym przepływie powietrza przez otwór, należy do dwóch podstawowych zależności służących wyznaczeniu strumienia objętości powietrza wentylacyjnego. W przypadku przepływu laminarnego lub będącego w fazie przejściowej, strumień wyznaczany jest z innej zależności, podanej w dalszej części bieżącego rozdziału.

Rozwiązanie zależności (2.1) wymaga informacji o wielkości i lokalizacji otworów oraz spadku ciśnień. Wielkość otworu determinuje charakter przepływu. Powietrze, przepływające przez otwór, jest w istocie płynem lepkiem. W wyniku występowania ruchu turbulentnego i odkształceń (skręcania) obserwuje się „skurczenie” strumienia przy krawędziach. Zjawisko to ujmuje bezwymiarowy, eksperymentalnie wyznaczany, współczynnik  $C_d$ , którego wartość zależy od geometrii otworu, lokalizacji obiektu, topografii terenu oraz od prędkości i kierunku napływu wiatru. Przy przepływach turbulentnych, a o takich mowa w tej pracy, bo wysokość przyjętych otworów wentylacyjnych jest większa niż 1cm, współczynnik  $C_d$  ma stałą wartość i dlatego strumień objętości powietrza jest proporcjonalny do pierwiastka

spadku ciśnienia całkowitego – ( $\Delta p$ ). W przypadku niskiej liczby Re przepływ staje się laminarny i współczynnik  $C_d$  zależy od pierwiastka z ( $\Delta p$ ), a więc strumień objętości powietrza jest proporcjonalny do ( $\Delta p$ ). Z uwagi na współczynnik  $C_d$  warto prześledzić poniższe relacje [1]. Załóżmy na wstępie, że przepływ powietrza przez otwór jest ustalony, a także, że powietrze jest płynem nielepkiem i nieściśliwym, a więc opisuje go poniższe równanie:

$$p_{1p} + \frac{1}{2}\rho V_{1p}^2 = p_{2z} + \frac{1}{2}\rho V_{2z}^2 \quad (2.2)$$

gdzie:  $p_{1p}$  i  $V_{1p}$  jest ciśnieniem i prędkością strugi na zewnątrz przed otworem, a  $p_{2z}$  i  $V_{2z}$  za otworem wentylacyjnym. Zakłada się, że gęstość powietrza jest identyczna w obu punktach przepływu i równa jest gęstości powietrza zewnętrznego, ponieważ rozpatruje się strugę powietrza tuż przed otworem – „1” i tuż za – „2”

Równanie ciągłości strugi, przy założeniu wyrównanego profilu prędkości w punkcie 1 i 2, ma postać:

$$\dot{V} = A_1 V_{1p} = A_2 V_{2z} \quad (2.3)$$

Wykorzystując równanie ciągłości i równanie Bernoulliego otrzymujemy poniższe wyrażenie na prędkość przepływu:

$$V_p = \sqrt{\frac{2(p_{1p} - p_{2z})}{\rho[1 - (A_2 / A_1)^2]}} \quad (2.4)$$

Jeśli przyjmiemy, że  $A_2$  różni się bardzo znacznie od  $A_1$  ( $A_2 \ll A_1$ ), co jest uzasadnione, bo przekrój w punkcie 1 leży na zewnątrz otworu wentylacyjnego, a w związku z tym wartość ilorazu  $A_2$  do  $A_1$  jest pomijalnie mała, stąd prędkość strugi wyniesie:

$$V_p = \sqrt{\frac{2(p_{1p} - p_{2z})}{\rho}} \quad (2.5)$$

Powyższe równanie dotyczy płynu nielepkiego – w rzeczywistości mamy do czynienia z gazem lepkiem. Zakłada się najpierw, że powietrze – przepływające przez dopływowe i odpływowe otwory wentylacyjne – charakteryzuje się tak wysoką liczbą Re, że przybiera kształt strumienia, którego największy przekrój vena contra jest rezultatem lepkości oraz nieuporządkowanego ruchu cząsteczek powietrza. Stąd ilość przepływającego przez otwór powietrza będzie niższa, z uwagi, że prędkość strumienia mnożona jest przez współczynnik  $C_d$ .

Norma brytyjska zaleca, dla otworów o ostrych krawędziach, stałą wartość współczynnika równą 0,61 [20]. Z badań wynika jednak, że wartość współczynnika

nie jest stała z racji zmiennej różnicy ciśnień na zewnątrz i wewnątrz budynku oraz różnej geometrii otworów.

Odrębnym zagadnieniem jest wyznaczanie współczynnika  $C_d$  dla otworów wewnętrznych, usytuowanych pomiędzy strefami, których wartość jest funkcją różnicy temperatur, prędkości przepływu powietrza oraz wysokości otworu. W literaturze przedmiotu podawane są różne wartości współczynnika, ale jest on generalnie wyższy niż przyjmowany dla strumienia, pomiędzy otoczeniem zewnętrznym a budynkiem i waha się pomiędzy 0,67 a 0,73 [75].

Przepływ powietrza przez bardzo wąskie otwory, tj. przez głębokie szczeliny lub mikropęknięcia muru, wykazuje cechy przepływu laminarnego lub takiego jak dla płynu lepkiego. W takim przypadku strumień objętości powietrza opisany jest równaniem Couette [10]:

$$\dot{V} = \left[ \frac{bh_h^3}{12 \mu L} \right] \Delta p \quad (2.6)$$

gdzie:

- $b$  [m] – długość szczeliny,
- $h_h$  [m] – wysokość szczeliny,
- $L$  [m] – głębokość szczeliny po długości przepływu,
- $\mu$  [Pa·s] – lepkość powietrza.

W przypadku szerszych szczelin, gdzie strumień powietrza wykazuje cechy przepływu przejściowego pomiędzy laminarnym a turbulentnym, zaleca się do jego wyznaczania zależność (2.7), która powstała ze scalenia równania (2.1) i (2.6) [10, 51, 53].

$$\dot{V} = k_p L (\Delta p)^{np} \quad (2.7)$$

gdzie:

- $k_p$  [ $m^2 \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ ] – współczynnik określający geometrię szczeliny,
- $np$  [–] – współczynnik określający charakter przepływu,
- $L$  [m] – długość szczeliny.

Wykładnik  $np$  dla całkowicie rozwiniętego przepływu turbulentnego wynosi 0,5, a dla laminarnego 1. Z praktyki wiadomo, że najbardziej adekwatna wartość wykładnika  $np$  dla szczelin zawiera się pomiędzy 0,6 i 0,7. W przypadku szczelin wokół zamkniętych okien zaleca się  $np = 0,67$ . Zależność (2.7) służąca do obliczania strumienia objętości powietrza pochodzącego z infiltracji powietrza przez szczeliny na obwodzie zamkniętych okien.

Co się tyczy współczynnika  $k_p$ , to istnieje duża trudność w doborze jego poprawnej wartości. Zależy ona od rodzaju okna. Ponadto geometria szczeliny może być bardzo różna, stąd i wartość współczynnika  $k_p$  waha się w szerokim zakresie. I tak: dla okna przesuwne jego średnia wartość wynosi 8, ale waha się od 2 do 30, a dla okna obrotowego przyjmuje się 21 z zakresu 6–80 [20]. Brak możliwości wy-

boru poprawnej wartości współczynnika  $k_p$  powoduje, że dla równania (2.7) zaproponowano jego zmodyfikowaną formę w następującej postaci [103]:

$$\Delta p = \alpha_{sz} \dot{V} + \beta_{sz} \dot{V}^2 \quad (2.8)$$

Współczynniki  $\alpha_{sz}$  i  $\beta_{sz}$ , dla szeregu okien, otrzymano eksperymentalnie [15]. Pierwszy wyraz równania (2.8) opisuje przepływ laminarny, drugi turbulentny.

## 2.2. Przegląd modeli matematycznych do predykcji naturalnej wymiany powietrza wentylacyjnego

Przedstawione w bieżącym rozdziale modele są powszechnie stosowanymi narzędziami inżynierskimi, wykorzystywanymi do predykcji naturalnego przepływu powietrza przez budynek. Modele te opisują zjawisko z różnym stopniem szczegółowości, stąd też i otrzymanywane wyniki obliczeń charakteryzują się różną dokładnością. Niektóre z tych modeli opisują strumień powietrza wentylacyjnego, powiększony o udział infiltracji, inne ją pomijają.

W klasycznym ujęciu procesy naturalnej wymiany powietrza w budynkach opisują równania Naviera-Stokesa, przy zadanych warunkach brzegowych. Uzupełnieniem opisu są modele turbulencji wraz z warunkami jednoznaczności, ale adekwatny dobór warunków wymaga wiedzy i doświadczenia z uwagi na nieuporządkowaną strukturę wiatru – (dodatek 3.1). Pełne charakterystyki przepływu powietrza wentylacyjnego są wynikiem stosowania numerycznych technik komputerowych, umożliwiających rozwiązywanie kompleksowego modelu, opartego na równaniach Naviera-Stokesa. W przypadku obiektu o szczególnym znaczeniu, czy też w sytuacji, gdy inwestor ma niestandardowe wymagania, stosowanie tych technik jest wskazane lub wręcz konieczne. Natomiast przy projektach „seryjnych”, a także na kolejnych etapach projektowania potrzebne są informacje o różnym stopniu zaawansowania. Odpowiednio do założeń projektowych, prace nad projektem, w tym także systemem wentylacji, prowadzone są przy różnym stopniu szczegółowości. Z uwagi na charakter zadania wykorzystuje się różne modele predykcji przepływu powietrza, które można podzielić na: empiryczne, teoretyczne, sieciowe, strefowe i CFD.

### 2.2.1. Modele empiryczne

Postać modeli empirycznych wiąże się z relacją pomiędzy ilością wymienianego powietrza lub prędkością jego przepływu a różnicą temperatur oraz prędkością wiatru. Uproszczona forma opisu zjawiska, która wynika z podstawowych równań mechaniki płynów, umożliwia szybkie ale szacunkowe wyliczenie ilości powietrza wentylacyjnego, bądź średniej prędkości przepływu. Poprawność modeli weryfikowana jest doświadczalnie. Modele empiryczne charakteryzują się także tym, że nieliniowe zależności i współzależności, wynikające m.in. z obecności wiatru, zastąpione są współczynnikami doświadczanymi lub przybliżonymi.

Modele te są wykorzystywane we wstępnej fazie projektu. Adekwatne informacje, uzyskane ze stosowania tych modeli, są istotne, ponieważ determinują dalszy poprawny postęp prac nad projektem.

Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane metody wyznaczania strumienia objętości powietrza wentylacyjnego:

### Model według Normy Brytyjskiej – 5925

Zalecane przez BS formuły na obliczanie infiltracji i wentylacji dotyczą obiektów jednostrefowych, zarówno z otworami na jednej ścianie, jak i na ścianach przeciwległych [10, 20]. Otwory wentylacyjne mogą być lokowane w różnym układzie. Formuły opisują przepływ powietrza, wynikający niezależnie: z różnicy temperatury ( $\dot{V}_{\Delta T}$ ) i z oddziaływania wiatru ( $\dot{V}_v$ ) oraz łącznego wpływu obu parametrów, przy różnej konfiguracji napływu wiatru. Przykładowo, dla pomieszczenia z dwoma otworami, na każdej z przeciwległych ścian, strumień objętości powietrza obliczany jest według następujących zależności:

$$\dot{V} = \dot{V}_{\Delta T} \quad \text{dla} \quad \frac{v}{\sqrt{\Delta T}} < 0,26 \left( \frac{A_I}{A_{II}} \right)^{1/2} \left( \frac{h}{\Delta C_p} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

$$\dot{V} = \dot{V}_v \quad \text{dla} \quad \frac{v}{\sqrt{\Delta T}} > 0,26 \left( \frac{A_I}{A_{II}} \right)^{1/2} \left( \frac{h}{\Delta C_p} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

gdzie:

$$\Delta T = T_i - T_o$$

h – odległość w pionie między otworami,

v – prędkość wiatru na żądanej wysokości,

$\Delta C_p$  – wypadkowa współczynników ciśnieniowych na fasadzie nawietrznej i zawietrznej budynku,

$$A_I - 1/A_I^2 = 1/(A_1 + A_3)^2 + 1/(A_2 + A_4)^2,$$

$$A_{II} - 1/A_{II}^2 = 1/(A_1 + A_2)^2 + 1/(A_3 + A_4)^2.$$

Na fasadzie nawietrznej znajdują się otwory 1 i 2, a na zawietrznej 3 i 4.

W przypadku budynków o ostrych krawędziach wartość współczynnika  $C_p$  jest prawie niezależna od prędkości wiatru. Wartości współczynnika, dla typowych w kształcie budynków, są dostępne w wielu źródłach m.in. [4, 20, 75, 86]. Współczynnik ten można także wyliczyć. W [5, 107] podano algorytm obliczania współczynnika  $C_p$ . Algorytm oparty jest na eksperymentalnie wyznaczonych funkcjach harmonicznym dla różnych kierunków napływu wiatru.

### Metoda ASHRAE

Metoda ASHRAE, stosowana do wyliczania infiltracji powietrza, wymaga znajomości efektywnej sumarycznej powierzchni otworów przepuszczających po-

wietrze. Informację tę można bezpośrednio uzyskać z [5] lub określić wytwarzając w budynku nadciśnienie albo podciśnienie:

$$\dot{V} = A_{ef} \sqrt{a\Delta T + bv_{met}^2} \quad (2.11)$$

gdzie:

|   |  |
|---|--|
| $A_{ef} [cm^2]$                                   | – efektywna powierzchnia otworów,  |
| $a [m^6 \cdot h^{-2} \cdot cm^{-4} \cdot K^{-1}]$ | – współczynnik odnoszący się do infiltracji wywołanej różnicą temperatur,    |
| $\Delta T [K]$                                    | – średnia różnica temperatury wewnętrznej i zewnętrznej,                     |
| $b [m^4 s^2 \cdot h^{-2} \cdot cm^{-4}]$          | – współczynnik odnoszący się do infiltracji wywołanej oddziaływaniem wiatru, |
| $v_{met} [m \cdot s^{-1}]$                        | – prędkość wiatru uzyskana z pomiarów meteorologicznych.                     |

Metoda ASHRAE podaje trzy różne wartości współczynnika „a” dla budynku jedno, dwu i trzy piętrowego. Współczynnik „b” zmienia wartość w zależności od liczby pięter oraz dodatkowo zależy od lokalizacji budynku w terenie. Rozróżnia się teren: otwarty, zabudowany, o zwartej zabudowie itd.

### Model Asynsley’a

Poza dwoma powyżej opisanymi metodami, które są najczęściej stosowane do predykcji powietrza wentylacyjnego, wykorzystywane są także inne metody. Należy do nich m.in. model zaproponowany przez Asynsley’a [8], dla budynku z otworami na przeciwległych ścianach. Model ten opisuje pełną wymianę powietrza wentylacyjnego, tzn. uwzględnia zjawisko infiltracji.

$$\dot{V} = \sqrt{\frac{(C_{p1} - C_{p2})v}{1/A_1^2 C_{d1}^2 + 1/A_2^2 C_{d2}^2}} \quad (2.12)$$

gdzie:

|             |   |
|-------------|---|
| $C_{p1/p2}$ | – współczynnik ciśnieniowy na zewnętrznej powierzchni przegrody po stronie nawietrznej – 1 i zawietrznej – 2, |
| $A_{1/2}$   | – powierzchnia otworu na przegrodzie po stronie nawietrznej i zawietrznej.                                    |

Utrzymanie komfortu cieplnego pomieszczenia wymaga nie tylko zapewnienia pożądanej przez użytkownika, temperatury i czystości powietrza, ale także prędkości przepływu powietrza wewnętrznego. Na przebieg prędkości powietrza przez budynek wpływa istotnie turbulencja przepływu, w tym działanie wiatru. Informacje na temat szacowania prędkości wewnętrznej powietrza wentylacyjnego są dostępne w wielu publikacjach, m.in.: [1, 50].

### 2.2.2. Modele teoretyczne

Dwa poniżej przedstawione modele – BRE i LBL – należą do uproszczonych modeli teoretycznych. Wyniki uzyskane w wyniku ich stosowania są dokładniejsze, niż te otrzymywane z modeli empirycznych. Są także mniej pracochłonne w użyciu, niż modele sieciowe. Można je stosować do predykcji przepływu powietrza jedynie w budynkach jednostrefowych.

#### Model BRE

Predykcja przepływu powietrza według tej metody wymaga wyznaczenia, za pomocą testu ciśnieniowego, strumienia objętości powietrza, przy spadku ciśnienia pomiędzy otoczeniem a wnętrzem obiektu – ( $\Delta p_t$ ). Eksperymentalne wyznaczenie strumienia objętości powietrza – ( $\dot{V}_t$ ) odbywa się zazwyczaj przy ( $\Delta p_t$ ) równym 50 Pa. Generowany różnicą temperatur i wiatrem przepływ powietrza przez budynek, według metody BRE, oblicza się z poniższej zależności:

$$\dot{V} = \dot{V}_t \left( \rho_o v_d^2 / \Delta p_t \right)^{nt} F(Ar, \Theta) \quad (2.13)$$

|                 |  |
|-----------------|--|
| $v_d$           | – prędkość wiatru na wysokości krawędzi dachu,                                 |
| $nt$            | – wykładnik otrzymany z testu ciśnieniowego,                                   |
| $F(Ar, \Theta)$ | – funkcja charakteryzująca przepływ powietrza zależna od liczby Archimedesesa, |
| $Ar$            | – liczone dla kąta napływu wiatru $\Theta$ , $Ar = \Delta T g h_p / (T_i v^2)$ |
| $h_p$           | – wysokość pomieszczenia.  |

Model BRE umożliwia wyliczenie ilości przepływającego powietrza w wyniku tylko występującej różnicy temperatur oraz niezależnie – jedynie przy oddziaływaniu wiatru. Przy przepływie spowodowanym wiatrem funkcja przybiera postać:

$$\dot{V}_v = \dot{V}_t \left( \rho_o v^2 / \Delta p_t \right)^{nt} F_w(\Theta) \quad (2.14)$$

$F_w(\Theta)$  jest funkcją, której wartość zależy od kierunku napływu wiatru.

Przy przepływie spowodowanym różnicą temperatur postać funkcji jest następująca:

$$\dot{V}_s = \dot{V}_t \left[ \Delta T \rho_o g h / (T_i \Delta p_t) \right]^{nt} F(s) \quad (2.15)$$

$F(s)$  jest funkcją, której wartość zależy od fizycznej charakterystyki budynku.

Wartości funkcji  $F(\Theta)$  i  $F(s)$  dla typowych budynków, przy kierunku napływu wiatru na budynek, określonym przez  $\Theta = 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  można znaleźć m.in. w [10].



### Model LBL (Lawrence Berkeley Laboratory)

Model LBL służy predykcji powietrza wentylacyjnego także w jednostrefowym budynku. Stosowanie tego modelu nie wymaga dokładnej znajomości fizycznej charakterystyki obiektu. Całkowita ilość powietrza wentylacyjnego jest sumą udziału strumienia generowanego różnicą temperatur i wywołowanego wiatrem:

$$\dot{V} = A_{ef} \sqrt{(\Delta p / \rho)} \quad (2.16)$$

gdzie: wielkość  $A_{ef}$  oznacza efektywną powierzchnię przepływu, określoną na podstawie testu ciśnieniowego lub obliczaną na podstawie danych zawartych w [5];  $A_{ef} = AC_d$ , gdzie  $A$  jest rzeczywistą powierzchnią otworu.

#### 2.2.3. Modele sieciowe

Omawiane w poprzednich punktach modele wymiany powietrza w budynkach, formułowane są przy założeniach upraszczających opis zjawiska, a to z kolei prowadzi do tego, że wyniki obliczeń obciążone są większym lub mniejszym błędem. Jak zaznaczono powyżej, na mocy jednego z założeń, obliczany jest zazwyczaj nie strumień masowy, a strumień objętości powietrza. Wspomniane modele nie obejmują wszystkich obiektów budowlanych. Dotyczą one jedynie budynków jednostrefowych, z otworami dla przepływu powietrza pomiędzy otoczeniem zewnętrznym budynku a jego wnętrzem. Natomiast, w budynkach wielostrefowych z naturalną wymianą powietrza, występują spadki ciśnień na wszystkich otworach. Zarówno na tych, które znajdują się w przegrodach zewnętrznych, jak i w ścianach działowych. Spadki ciśnień, powstające na otworach w ścianach wewnętrznych, mają jednak niewielką wartość w porównaniu do tych, które występują na otworach zewnętrznych. Budynki jednostrefowe, poza sektorem wielorodzinnym, stanowią szeroką klasę obiektów. Są to budynki, jak we wstępie podano: przemysłowe, inwentarskie, użyteczności publicznej i coraz częściej nawet u nas występujące – biurowe. Budynki jednorodzinne lub niewielkie domy mogą być traktowane również jak obiekty jednostrefowe [10].

W modelu sieciowym rolę rozkładu architektonicznego obiektu przejmują węzły siatki. Węzłem jest pokój, ale także i strefa w budynku. Węzły są powiązane pomiędzy sobą tzw. ścieżkami przepływu o określonym spadku ciśnienia. Każdy z węzłów sieci odpowiada więc innej wartości ciśnienia. Znane są zazwyczaj ciśnienia w węzłach na zewnątrz budynku. Z uwagi na nieliniową relację pomiędzy strumieniem masowym powietrza a spadkiem ciśnienia w węzłach wewnętrznych, obliczenia prowadzi się rozwiązując iteracyjnie równania przepływu. Spadki ciśnienia, powstające w wyniku przepływu w środku budynku, mają wpływ na kształtowanie przepływu powietrza przez otwory lokowane w ścianach zewnętrznych. Modele sieciowe stosuje się do dużych obiektów budowlanych, w których konieczny jest podział na strefy. Dzięki możliwości wyliczania wymiany masy pomiędzy strefami

modele te przydatne są w budynkach szczególnego przeznaczenia takich, jak: szpitale, zakłady przemysłowe czy pralnie.

#### 2.2.4. Modele strefowe

Wszystkie, dotychczas opisywane modele, można zaliczyć do mniej lub bardziej uproszczonego matematycznego opisu wymiany powietrza pomiędzy otoczeniem zewnętrznym budynku a jego wnętrzem. W opisie tych modeli zawarte jest a priori założenie o dokładnym wymieszaniu powietrza dopływającego z zewnątrz z powietrzem wewnętrznym. Z informacji uzyskanych na podstawie pomiarów, w typowych obiektach rzeczywistych wynika, że często występuje stratyfikacja temperatury wewnętrznej. Stwierdzenie to odnosi się także do obiektów z wentylacją wyporową, z wyraźnie zaznaczoną linią rozdziału stref. Natomiast coraz większe wymagania, dotyczące utrzymania komfortu cieplnego i czystości powietrza w budynkach, nakładają na projektantów obowiązek zapewnienia stałej temperatury w pomieszczeniu. Zaczęto więc stosować nowe narzędzia do wyznaczania rozkładu pól temperatur i prędkości powietrza, a także jego wilgotności oraz koncentracji zanieczyszczeń. Wyniki otrzymywane ze stosowania modelu strefowego są porównywalne z symulacjami CFD [1, 10]. Modele strefowe umożliwiają symulację rozkładu pól temperatur wewnętrznych i prędkości przepływu w mini strefach. Wymaga to w pierwszej kolejności sformułowania równania zachowania masy i energii, do spółki z równaniem pędu, lub identyfikację przepływu głównego. W pierwszym kroku formułuje się dla każdej mini strefy jedynie równania ciągłości i energii, które są uzupełniane modelem temperatury i ciśnienia. Uzupełnienie to powoduje wyrównanie liczby niewiadomych z liczbą równań.

#### 2.2.5. Symulacje CFD

Istotą symulacji programami CFD (Computational Fluid Dynamics) jest rozwiązanie równań Naviera-Stokesa, przy wyznaczonych warunkach jednoznaczności. Rozwiązanie równań zachodzi we wszystkich punktach przyjętej dwuwymiarowej lub trójwymiarowej siatki. Niezwykle istotną kwestią, decydującą w dużej mierze o powodzeniu symulacji, jest adekwatny dobór warunków brzegowych oraz siatki.

Modele CFD wykorzystywane są głównie do wyznaczenia pól temperatur i prędkości w budynku oraz rozkładu ciśnień na zewnątrz budynku, w stanie ustalonym. Należy zauważyć, że w sytuacji np. nocnego chłodzenia budynków w okresie letnim umiejscowionych w strefie cieplej i gorącej, stan ustalony nie jest adekwatny do przebiegu zjawiska.

Programy CFD stały się niezwykle popularnym narzędziem w procesie projektowania systemów wentylacyjnych i prognozowania przepływów w nowo wznoszonych budynkach. Początków tej praktyki należy szukać w modelowaniu strumieni przepływających przez przestrzenie o prostej geometrii. Wówczas wyniki obliczeń numerycznych porównywano z rezultatami pomiarów wykonywanych w małej skali, z użyciem anemometru doplerowskiego. Następnie modelowanie przepływu

rozszerzono o zagadnienia związane z wyporem termicznym i pełniejsze porównania z eksperymentem. Na początku lat 90-tych obliczenia numeryczne zaczęły obejmować przestrzenie o skomplikowanej geometrii, jak np. terminal lotniczy. We wszystkich badanych przypadkach zakładano stałość strumieni – wpływającego i wypływającego. Strumień powietrza wentylacyjnego mógł być tylko generowany przez wiatr o stałej prędkości. Efekt kominowy był pomijany. Symulacja w tym wypadku dotyczyła modelowania jednostronnej wentylacji, w której wymiana powietrza wynikała ze stałego naporu wiatru oraz z obecności wewnętrznego źródła ciepła. Okazało się, że wyniki obliczeń są wrażliwe na zmianę ciśnienia panującego na zewnątrz.

Wszystkie przepływy modelowane numerycznie zawierają pewien stopień uproszczenia [12, 39, 75]. Może on dotyczyć założenia, że źródło ciepła generuje czystą strugę, czy też, że przyjęta podziałka siatki gwarantuje właściwe usytuowanie węzłów. Najważniejsze jednak w odniesieniu do programów CFD jest to, iż są one stale poprawiane i udoskonalane. Należy bardzo silnie zaakcentować, że niezbędne informacje wykorzystywane do podniesienia sprawności CFD, czerpie się m.in. z eksperymentu. I tak rezultaty obliczeń numerycznych dotyczące trybu waporowego wymiany powietrza wentylacyjnego w obecności pojedynczej strugi konwekcyjnej, otrzymane przy użyciu programu CFD porównano z danymi eksperymentalnymi [65]. Eksperyment obejmował dwu- i trójwymiarowy przepływ. W małej skali parametry przepływu odnosiły się do wody i soli, a przy dużej skali eksperymentu – wykorzystywano ciepło zawarte w powietrzu. Konkluzja z badań dotyczyła lokalizacji powierzchni rozdziału, która – jak wiadomo (a informację tę uzyskano z eksperymentu) – jest niezależna od strumienia ciepła. Główną różnicę, pomiędzy symulacjami 2D i 3D zauważono w niewielkiej zmianie intensywności zasysania powietrza do strugi; przy 2D była większa, niż przy modelowaniu 3D. Rozbieżność ta wynika prawdopodobnie z ograniczeń wymiarowych, narzuconych na strumień, a z tego faktu wynika podniesienie lokalizacji powierzchni rozdziału pomiędzy warstwami powietrza oraz wzrost zredukowanej grawitacji  $g'$ .

Numeryczne modelowanie przepływów, generowanych dużymi wyporami termicznymi, w których zarówno konwekcja, jak i proces uwarstwienia powietrza, stawia przed programami CFD warunki nie do spełnienia. Ten rodzaj przepływów nie mieści się w klasie testowanych przepływów wentylacyjnych. Przy pełnej symulacji tak skomplikowanych zjawisk, jakimi są te przepływy, czas zużyty na przygotowanie programu jest długi, w porównaniu z przeprowadzeniem w miarę prostego eksperymentu. Nawet wtedy, gdy obliczenia numeryczne CFD przepływów wentylacyjnych dostarczają poprawnych odpowiedzi pozostaje pytanie, w jaki sposób to narzędzie może być użyte w procesie projektowym budynków. Projektant musi wyczuwać efekt wprowadzanych zmian na projekt i późniejszą eksploatację budynku. Jednakże nawet ściśle określone odpowiedzi, wynikające z każdej opcji projektowej, nie stwarzają tych możliwości. Zastosowaniem dla CFD byłoby dokonywanie wstępnej analizy zagadnienia, w zastępstwie strefowego modelowania przestrzeni przepływu.

U nas, w kraju, wykonuje się także badania z wykorzystaniem technik CFD. Zaawansowane prace numeryczne prowadzone są przez zespół pracowników Politechniki Gliwickiej pod kierownictwem prof. Zb. Popiołka [81, 82].

Podsumowując należy stwierdzić, że aplikacje CFD należą do najbardziej pożądaných narzędzi, służących wyznaczaniu strumieni masowych powietrza. Ale okazuje się, że literatura przedmiotu w tym zakresie nie jest zbyt bogata, przykładowo – [38, 68]. Przyczyna tkwi być może w tym, że stosowanie technik CFD jest niezwykle czasochłonne. W przypadku wentylacji mechanicznej takie zadanie nie stwarza problemów.

### 2.3. Badania procesów ciepłno-przepływowe w budynkach z naturalną wentylacją w literaturze przedmiotu

Nie jest możliwe poprawne wyznaczanie naturalnego przepływu powietrza wentylacyjnego przez budynek bez jednoczesnego modelowania procesu wymiany ciepła pomiędzy budynkiem a jego otoczeniem. Natomiast, w praktyce inżynierskiej, obliczanie naturalnych przepływów powietrza odbywa się niezależnie od obliczeń dotyczących procesów przenikania ciepła przez przegrody budynku.

Praktyka ta jest stosowana zarówno do budynków nowowznoszonych, jak i poddawanych termomodernizacji i rewitalizacji.

Brak kompleksowego traktowania procesów zachodzących w budynku utrudnia przede wszystkim niedostatek odpowiednich narzędzi. Programy komputerowe, które spełniają opisane wymagania, z różnych względów są niedostępne dla większości projektantów.

Obecnie zakres wymagań ulega poszerzeniu z uwagi na wentylację hybrydową. Wydaje się, że stosowanie tego rozwiązania byłoby korzystniejsze, z energetycznego punktu widzenia, w porównaniu z wentylacją mechaniczną. W naszej strefie klimatycznej wentylacja naturalna może z powodzeniem współdziałać z wentylacją mechaniczną w układzie hybrydowym, jak to ma zastosowanie w innych krajach o podobnym, a nawet ostrzejszym klimacie. Dlatego też prowadzone są intensywne prace zarówno nad modelowaniem tego systemu, jak i nad ich technikami obliczeniowymi [17, 32, 33, 36, 45, 48, 52, 56, 61, 76, 87, 106, 109].

W ramach projektu HybVent przeprowadzono szereg badań dotyczących procesów wymiany powietrza w dziedzinie działania systemu wentylacji hybrydowej i jednocześnie zapotrzebowania ciepła do celów grzewczych. Do analizy tych procesów wykorzystano metodę Monte Carlo. Uzyskano nieustalone przebiegi strumienia masowego powietrza oraz mocy grzewczej. Dynamikę procesów, w wybranych obiektach budowlanych, wywoływały wahania parametrów klimatu. W obliczeniach uwzględniono ich losowy charakter.

Wynikiem prowadzonych prac było wyznaczenie, w konkretnych warunkach klimatycznych, zakresu stosowania wentylacji naturalnej. Jest to duży postęp w aplikacji wentylacji naturalnej, nawet wtedy gdy działa ona w układzie skojarzonym. Ponieważ w okresie wcześniejszym widziano zastosowanie wentylacji naturalnej jedynie w nocnym wychłodzeniu obiektów budowlanych. J. van der Maas przed

stawił w 1991 roku prosty model, który wiązał wymianę ciepła w klatce schodowej, o dużej masie, z wymianą powietrza na potrzeby nocnego chłodzenia. Powietrze, w tym modelu, wymieniane jest w wyniku jedynie różnicy temperatur. Ale temperatura powietrza zarówno świeżego, jak i zużytego oraz temperatura ściany, przedstawione są jako funkcje zależne od czasu [85].

Wprowadzenie nowych technologii budowlanych rozszerzyło pole działania badaczy. Procesy ciepłno-przepływowe, które zachodzą w obiektach budowlanych, różnią się między sobą nie tylko dlatego, że budynki poddawane są innym wymuszeniom zewnętrznym, czy są inaczej eksploatowane, ale dlatego, iż mają różną strukturę materiałową przegród budowlanych. Wynikać może z tego bariera ograniczająca skuteczność okresowych obniżen temperatury w obiektach. Stąd też różnorodność materiałów budowlanych oraz nowe technologie konstruowania budynków, skierowało uwagę badaczy na procesy związane z akumulacją ciepła w przegrodach budynku jak i intensywnością przenikania ciepła przez te przegrody. W budynkach o niskiej zdolności akumulacji ciepła, w niesprzyjających warunkach, które mogą wystąpić w lecie, dochodzi do przegrzania wnętrza. Przedstawione m.in. przebiegi temperatur w warstwach ścian o różnej gęstości materiału, uzyskano z symulacji procesów przeprowadzonych programem Energy Plus [69, 70]. Podobnie w pracy [64] analizowano wpływ konstrukcji przegród budowlanych na nieustaloną wymianę ciepła, w warunkach zmiennych obciążeń zewnętrznych i wewnętrznych. Badanie realizowano za pomocą programu TSBI-3. Algorytm numeryczny zezwalał także na badanie przebiegów wymiany powietrza wentylacyjnego. Obaj Autorzy wskazali, że informacje o tych procesach powinny być dostępne projektantom.

Literatura przedmiotu, oprócz rezultatów badań uzyskiwanych z eksperymentu numerycznego, przedstawia także wyniki rozwiązań analitycznych. Do takich prac należą badania prowadzone przez Y. Li i A. Delsante. Stworzyli oni matematyczne modele, w których ilość wymienianego powietrza pomiędzy budynkiem i otoczeniem jest determinowana nie tylko oddziaływaniem parametrów klimatu, ale także wartością współczynników przenikania ciepła przegród budynku oraz mocą wewnętrznych źródeł ciepła. Mimo, że proponowane modele sprowadzają się do bilansu powietrza wewnętrznego w stanie ustalonym, to jednak w ograniczony sposób opisują jednoczesny proces występowania przepływu ciepła i powietrza. Modele te zainspirowały przedstawianą tu pracę. Dlatego też rozdział 8 zawiera krytyczną analizę wyników badań uzyskanych ze zmodyfikowanych, na potrzeby przedstawianej pracy, modeli Li, Delsante [73, 74].

Bardzo zaawansowany model matematyczny procesów ciepłno-przepływowych, w budynkach o złożonej przestrzennej geometryczno-materiałowej strukturze, został zaproponowany i rozwiązany analitycznie w przypadku ogólnym przez prof. W. Dzieniszewskiego z IPPT [47].

Bieżący rok przyniósł szereg publikacji o zrealizowanych projektach zaawansowanej wentylacji naturalnej (ANV) w wielokondygnacyjnych budynkach, m.in. w USA i Anglii. Systemy te działają w trybie wyporowym jedynie w wyniku wytwarzanego deficytu gęstości powietrza [37, 79, 80].



## 3. Parametry klimatu

### 3.1. Promieniowanie słoneczne i temperatura otoczenia

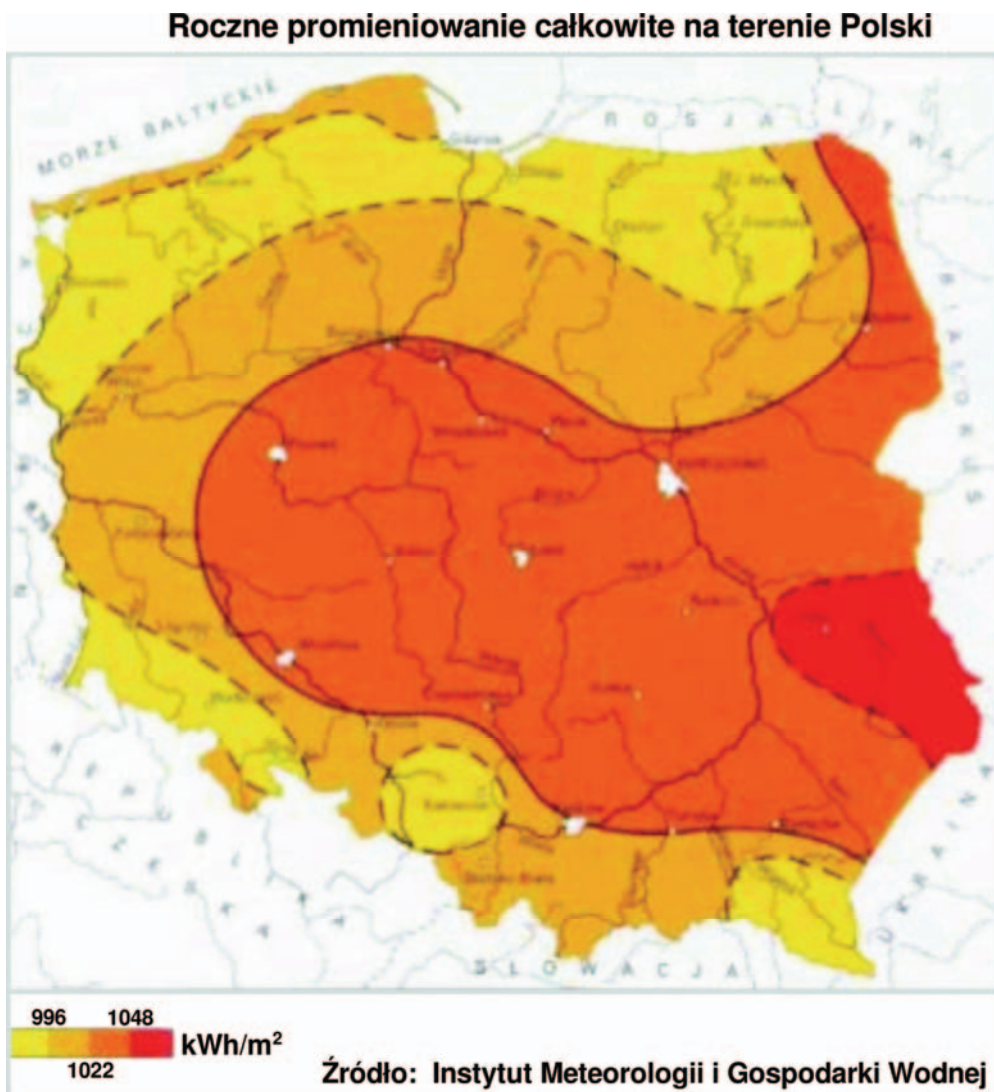
Klimat określa zbiór parametrów, do których zalicza się: całkowite i dyfuzyjne promieniowanie słoneczne, temperaturę otoczenia, prędkość i kierunek wiatru oraz wilgotność względną powietrza. Do uzyskania charakterystyk ciepło-przepływowych budynków wykorzystano przebiegi dobowe wymienionych powyżej parametrów, z wyjątkiem wilgotności. Przebiegi dobowe otrzymano z uśrednienia miesięcznych danych wieloletnich. Bazą danych, niezbędną do otrzymania wartości średnich, były ciągi meteorologiczne IMGW parametrów klimatu z lat 1976–1985 dla Warszawy.

Wartości rzeczywiste większości parametrów odczytywane są na stacjach meteorologicznych przez całą dobę, w odstępach trzygodzinnych, począwszy od 1-ej w nocy. W przypadku całkowitego i dyfuzyjnego promieniowania słonecznego, pierwszy odczyt ma miejsce o godzinie 3<sup>00</sup> nad ranem, a ostatni o 21<sup>00</sup> i odbywa się w odstępach godzinnych. W czasie każdej godziny zliczane jest natężenie promieniowania padającego na powierzchnię równoległą do powierzchni ziemi. Na przykład w czerwcu pierwsze sumy dobowe promieniowania słonecznego otrzymujemy o godzinie 4<sup>00</sup>, bo zbierane są pomiędzy 3<sup>00</sup>, a 4<sup>00</sup> nad ranem. Z uwagi na ruchomy czas wschodu i zachodu Słońca, pierwsze i ostatnie pomiary promieniowania słonecznego, dla większości dni w roku, mają wartości zerowe.

W przypadku temperatury otoczenia i promieniowania słonecznego korzystano z danych zidentyfikowanych w Zakładzie Problemów Eko-Budownictwa. Promieniowanie słoneczne traktowane jest tam w kategoriach współczynnika jasności promieniowania całkowitego (stosunek promieniowania całkowitego padającego na płaszczyznę równoległą do płaszczyzny Ziemi i promieniowania na płaszczyznę ponad atmosferą) oraz rozproszonego (stosunek promieniowania rozproszonego padającego na płaszczyznę równoległą do płaszczyzny Ziemi i promieniowania na płaszczyznę ponad atmosferą) [24, 30, 72]. Analiza promieniowania słonecznego, w kategoriach współczynnika jasności, pozwala na ustalenie ogólnych relacji między promieniowaniem całkowitym i rozproszonym, niezależnie od zmian poziomu tego promieniowania, związanych ze zmianami natężenia promieniowania na płaszczyźnie poziomej poza atmosferą ziemską dla danej lokalizacji. W bieżącej pracy wykorzystano jedynie wartości uśrednione danych IMGW, a gęstości strumienia promieniowania słonecznego obliczono według zamieszczonych w rozdziale 3 zależności.

Słoneczne zyski energetyczne stanowią składową bilansu cieplnego budynku. Słoneczna energia cieplna przekazywana jest do wnętrza budynku przez ściany i dach oraz za pośrednictwem okien. W przypadku przegród przezroczystych transmisyjność szyby okiennej zależy od kąta padania promieni słonecznych. Graficzna współzależność tych wielkości dostępna jest w [93]. Obliczenia, wykonywane na

potrzeby tej pracy, wymagały stworzenia funkcyjnej zależności relacji pomiędzy kątem padania a transmisyjnością szkła okiennego. Funkcja ta jest przedstawiona i opisana w rozdziale 6, w założeniach do autorskiego programu komputerowego. Otrzymana funkcja jest wynikiem aproksymacji wykresu podanego w [93].



Rys. 3.1. Średnie roczne sumy całkowitego promieniowania słonecznego



Oddziaływanie promieniowania słonecznego na ścianę budynku wyróżnia niezależnie: wpływ promieniowania bezpośredniego, oraz promieniowania dyfuzyjnego. Strumień promieniowania bezpośredniego zgodnie z teorią Liu-Jordana, traktowany jest jako izotropowy. Dodatkowo uwzględnia się promieniowanie odbite od płaszczyzny gruntu. Gęstości wszystkich rozpatrywanych strumieni [ $W \cdot m^{-2}$ ], na dowolnie umieszczone w przestrzeni powierzchni, wyznacza się z sum godzinowych IMGW.

Według Liu-Jordana całkowitą gęstość strumienia energii promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię pochyloną pod kątem  $\beta$  do poziomu, można opisać wzorem [83, 93, 94]:

$$G_{\beta} = G_b R_b + G_d R_d + (G_b + G_d) \rho_r R_0 \quad (3.1)$$

gdzie:

- $G_b$  – gęstość strumienia promieniowania bezpośredniego na powierzchnię poziomą – dana pomiarowa,
- $G_d$  – gęstość strumienia promieniowania dyfuzyjnego na powierzchnię poziomą – dana pomiarowa,
- $R_b$  – współczynnik korekcyjny dla promieniowania bezpośredniego,
- $R_d$  – współczynnik korekcyjny dla promieniowania rozproszonego,
- $R_0$  – współczynnik korekcyjny dla promieniowania odbitego, będący współczynnikiem „widzenia” płaszczyzny ściany (przyjmuje się, że  $R_0 = 0,5$ ),
- $\rho_r$  – współczynnik refleksyjności podłoża zależny od rodzaju podłoża odbijającego, zwany bezwymiarowym współczynnikiem odbicia.

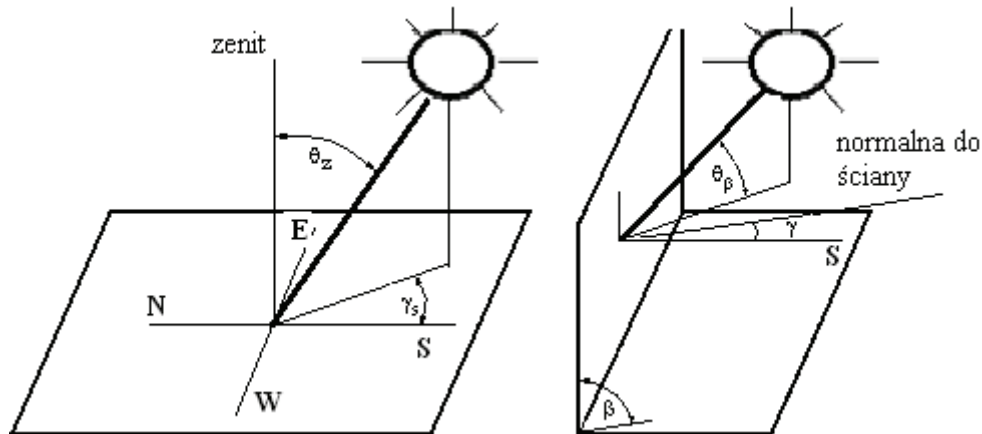
Współczynniki korekcyjne wyznaczyć można z następujących zależności:

$$R_b = \frac{\cos \theta_{\beta}}{\cos \theta_z}, \quad R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2}, \quad R_0 = \frac{1 - \cos \beta}{2}. \quad (3.2)$$

Relacje pomiędzy kątem padania promieniowania słonecznego a płaszczyzną pionową (kątem  $\theta_{\beta}$  dla ściany pionowej  $\beta = 90^{\circ}$ ) i poziomą, przedstawia rys. 3.2. Dodatkowo zaznaczono azymut ściany  $\gamma$ , tj. kąt jaki tworzy normalna do ściany z kierunkiem lokalnego południka oraz azymut słońca  $\gamma_s$ . Oba te kąty mierzone są względem kierunku południowego. Przyjęto kierunek wschodni za ujemny, a zachodni za dodatni.

Kąt padania promieniowania słonecznego  $\theta_{\beta}$  na dowolnie usytuowaną powierzchnię jak na rys. 3.2 wyznacza się ze wzoru (3.3):

$$\cos \theta_{\beta} = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (3.3)$$



Rys. 3.2. Kąt padania promieniowania słonecznego  $\theta_\beta$  na dowolnie usytuowaną powierzchnię określoną kątami  $\beta$

dla powierzchni pionowej, dla której  $\beta = 90^\circ$  otrzymuje się:

$$\cos \theta_\beta = \cos \delta (\sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \sin \gamma \sin \omega) - \sin \delta \cos \phi \cos \gamma \quad (3.4)$$

dla powierzchni poziomej, tj. dla  $\beta = 0$ , kąt padania promieniowania staje się równy tzw. kątowi zenitu  $\theta_z$ :

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (3.5)$$

W powyższych wzorach kąt  $\phi$  określa szerokość geograficzną (dodatnią dla półkuli północnej), a kąt  $\delta$  wyznacza deklinację słoneczną, której wartość dla określonego „n-tego” dnia roku wyliczyć można z przybliżonej formuły Coopera:

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (\text{stopnie}) \quad (3.6)$$

Energia pochodząca z promieniowania słonecznego, padająca na ścianę, jest przez nią częściowo absorbowana i jej ilość scharakteryzowana jest współczynnikiem absorpcji  $\alpha_s$ . Stąd energia absorbowana przez ścianę poziomą wyniesie:

$$E_{\text{abs}} = \alpha_s (G_b + G_d) \quad (3.7)$$

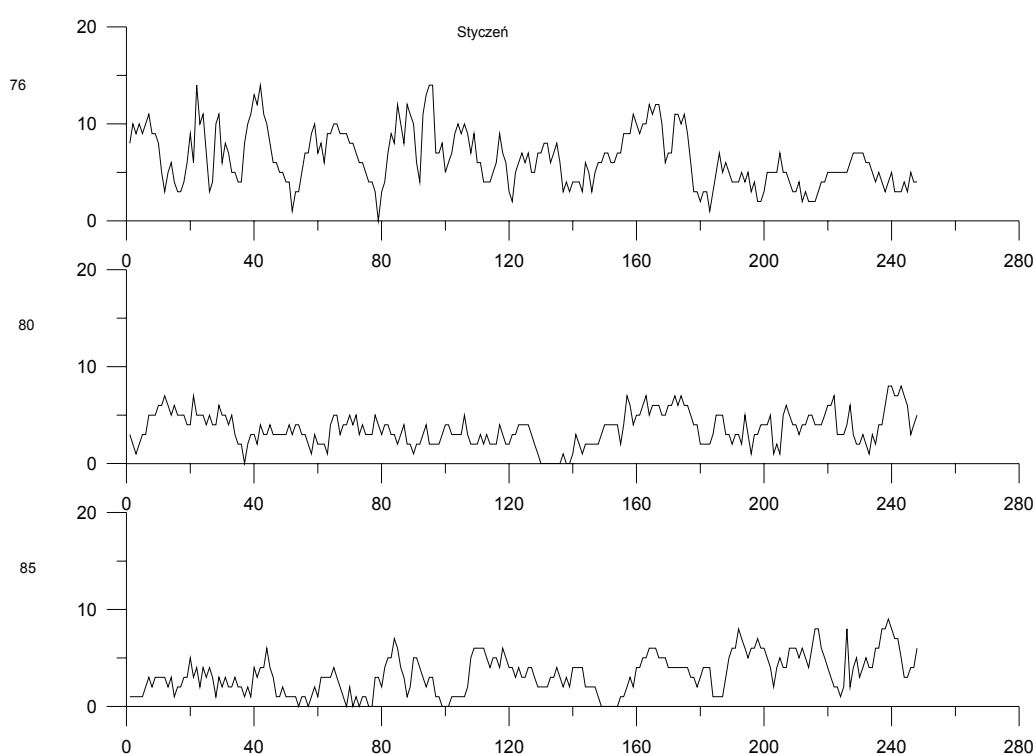
a na płaszczyznę pionową, uwzględniając wzory (3.1) i (3.2)

$$E_{\text{abs}} = \alpha_s \left( G_b \frac{\cos \theta_\beta}{\cos \theta_z} + 0,5 G_d + 0,5 \rho_r (G_b + G_d) \right) \quad (3.8)$$

Co się tyczy temperatury otoczenia, to rzeczywiste ciągi meteorologiczne uśrednione po latach i miesiącu, aproksymowano funkcjami harmonicznymi, które opisują średnią miesięczną dobę dla Warszawy. Wyniki identyfikacji podano w [23, 28, 30].

### 3.2. Identyfikacja prędkości i kierunku wiatru

Dominującą cechą wiatru, podobnie jak innych parametrów klimatu, jest zmienność i nieregularność jego prędkości w czasie. Cechę tę uwidacznia rys. 3.3.



Rys. 3.3. Miesięczne, rzeczywiste przebiegi prędkości wiatru – dane IMGW dla Warszawy w styczniu w latach: 76, 80, 85

Rysunek przedstawia zapis rzeczywistych prędkości wiatru uzyskanych z pomiarów IMGW w styczniu w Warszawie, w roku: 76, 80 oraz 85. Silne wahania tego parametru spowodowane są turbulencją, która jest generowana niestabilnym układem termicznym, wytwarzanym przy powierzchni ziemi oraz chropowatością terenu. Przez chropowatość terenu należy rozumieć nie tylko naturalne jego ukształtowanie, ale także przeszkody ukształtowane ręką człowieka.

Charakter przepływu powietrza, niustalony w czasie, narzuca identyfikację stochastyczną prędkości wiatru. Zakłada się, podobnie jak w przypadku temperatury

otoczenia, że każda wielkość może być sumą składowej średniej – deterministycznej oraz wartości losowej. Zakłada się także, że w pobliżu ziemi prędkość wiatru jest stała, a jej prędkość średnia zależy jedynie od odległości pionowej wektora od powierzchni gruntu.

Horyzontalny ruch powietrza dla płynu nielepkiego w stanie ustalonym, nad terenem otwartym w obszarze poruszania się człowieka, opisuje równanie Naviera-Stokesa oraz równanie ciągłości dla płynu nieściśliwego – dodatek 3.1.

W pracy, do wyznaczania prędkości wiatru na dowolnej wysokości, skorzystano z zapisu potęgowego, stworzonego przez Hellmana, a zmodyfikowanego przez Suttona, który ma następującą postać [71, 102]:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^N \quad (3.9)$$

- $v_1, v_2$  – średnie prędkości wiatru na wysokości, odpowiednio:  $z_1, z_2$ ,  
 $N$  – wykładnik potęgowy, zależny od szorstkości podłoża, prędkości wiatru, stanu równowagi i czasu uśrednienia prędkości wiatru.

Wzór potęgowy był przez wielu badaczy wiatru weryfikowany eksperymentalnie także przez Davenporta [42, 43]. Uzyskano dużą zgodność wyników z pomiarami prowadzonymi m.in. na 200 metrowych masztach gradientowych.

### 3.2.1. Modelowanie wiatru

Modelowaniu prędkości wiatru poświęca się bardzo dużo uwagi, ponieważ wiatr coraz szerzej wykorzystywany jest jako odnawialne źródło energii. Z tej przyczyny wiatr jest zidentyfikowany dla bardzo wielu regionów geograficznych [104]. W rejonach Ziemi ubogich w surowce energetyczne lub pozbawionych możliwości konwencjonalnego wytwarzania energii, prowadzone są bardzo intensywne prace nad oszacowaniem i prognozowaniem struktury i zasobów energetycznych wiatru. Na obszarach, gdzie brak jest sprawnego serwisu meteorologicznego, nie wykonuje się zazwyczaj regularnych pomiarów, toteż występuje tam potrzeba modelowania zjawiska i generowania meteorologicznych ciągów prędkości wiatru [18, 40, 57, 62, 67, 89, 90].

W naszym kraju dysponujemy pełnymi danymi meteorologicznymi z 12 posterunków obserwacyjnych okresu przedwojennego i 56 stacji okresu powojennego. Prowadzone pomiary i badania wskazują, że potencjalne możliwości wykorzystania energii wiatrowej w Polsce są znaczące [84]. Z drugiej strony wiatr, jako parametr klimatu, wpływa na energochłonność obiektów budowlanych, także poprzez intensywność wymiany powietrza w pomieszczeniach [29]. W naszym klimacie ogrzanie powietrza na cele wentylacyjne odgrywa istotną rolę w całkowitym bilansie ciepła budynku. W ostatnich latach, w Europie Zachodniej następuje wzrost zainteresowania wiatrem, z racji prób powrotu do systemów wentylacji naturalnej lub w układzie

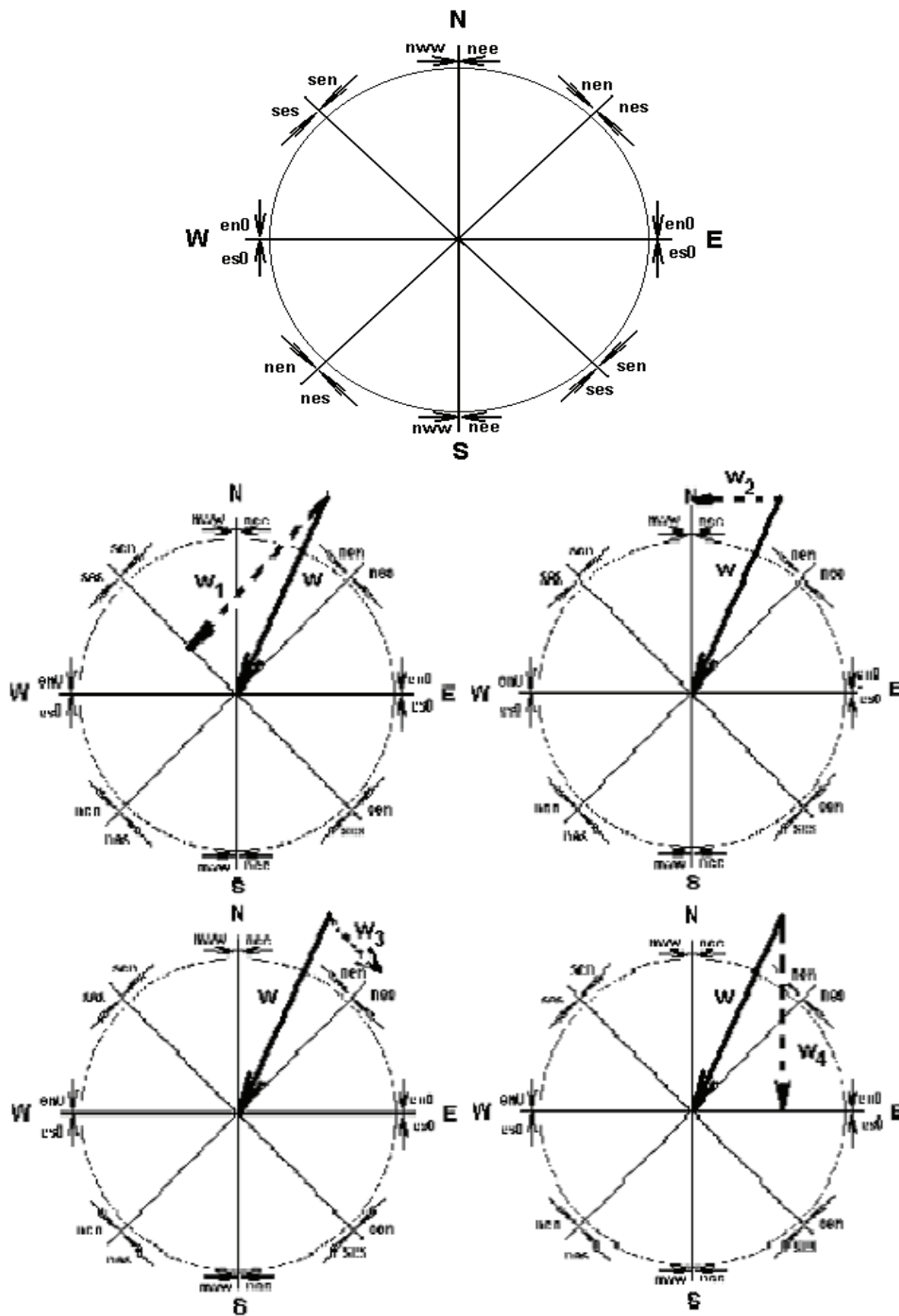
hybrydowym, w budynkach mieszkalnych oraz użyteczności publicznej nawet o wielotysięcznej kubaturze. Zjawisko to nabiera znaczenia, głównie z powodu ograniczenia zużycia energii w eksploatacji systemów wentylacji mechanicznej, czy klimatyzacji. Dodatkowo zwrot ku naturalnej wymianie powietrza w budynkach, wynika z braku akceptacji przez użytkowników warunków mikroklimatycznych, które panują w pomieszczeniach wyposażonych w systemy klimatyzacyjne.

Tak jak w przypadku temperatury, dziesięcioletnie dane meteorologiczne prędkości i kierunku wiatru posłużyły do określenia zależności trygonometrycznej, opisującej ich średni dzienny przebieg. Funkcję harmoniczną wyznaczono dla 12 miesięcy i ośmiu podstawowych kierunków napływu wiatru na obiekt. Ponadto wyznaczono relacje zmienności funkcji harmonicznego opisującej średnią dobę wraz z wysokością. Analizowane zmienne prędkości wiatru charakteryzują się rozkładem Weibulla [31].

Analizę kierunkową wiatru oparto na podziale kąta pełnego na osiem głównych kierunków, na które rzutuje się wektory prędkości. Każdy kierunek wyznacza prostopadłą do niego płaszczyznę, która "przechwytuje" na siebie wiatry z danego kierunku tzn. wiatry, których wektor prędkości posiada dodatni rzut na ten kierunek (w zwyczajowo przyjętej konwencji). Przykładowo, wiatr o kierunku północnym ma w istocie wektor prędkości skierowany na południe. Nazwa płaszczyzny umownie definiuje kierunek wiatru. Zbudowane według opisanej zasady kierunkowe ciągi meteorologiczne parametru wyznaczają osiem – prostopadłych do kierunku oddziaływania wiatru – płaszczyzn, które mogą być traktowane w dalszej analizie zjawiska jako płaszczyzny przegród budynków.

Płaszczyzna:

- **EN0** jest prostopadłą do kierunku N ( $0^\circ$ ) i przechwytuje wiatry z azymutów  $270^\circ$  do  $90^\circ$  przez  $0^\circ$ .
- **SEN** jest prostopadłą do kierunku NE ( $45^\circ$ ) i przechwytuje wiatry z azymutów  $315^\circ$  do  $135^\circ$  przez  $0^\circ$ .
- **NEE** jest prostopadłą do kierunku E ( $90^\circ$ ) i przechwytuje wiatry z azymutów  $0^\circ$  do  $180^\circ$  przez  $90^\circ$ .
- **NES** jest prostopadłą do kierunku SE ( $135^\circ$ ) i przechwytuje wiatry z azymutów  $45^\circ$  do  $225^\circ$ .
- **ES0** jest prostopadłą do kierunku S ( $180^\circ$ ) i przechwytuje wiatry z azymutów  $90^\circ$  do  $270^\circ$ .
- **SES** jest prostopadłą do kierunku SW ( $225^\circ$ ) i przechwytuje wiatry z azymutów  $135^\circ$  do  $315^\circ$ .
- **NWW** jest prostopadłą do kierunku W ( $270^\circ$ ) i przechwytuje wiatry z azymutów  $180^\circ$  do  $360^\circ$ .
- **NEN** jest prostopadłą do kierunku NW ( $315^\circ$ ) i przechwytuje wiatry z azymutów  $225^\circ$  do  $45^\circ$  przez  $0^\circ$ .



Rys. 3.4. Podział kąta pełnego na osiem głównych kierunków, na które rzutuje się wektory prędkości wiatru

Tablica 3.1. Sumaryczny wykaz kierunków napływu wiatru

|   | <b>EN0</b> | <b>SEN</b> | <b>NEE</b> | <b>NES</b> |
|---|------------|------------|------------|------------|
| ⊥ | N (0°)     | NE (45°)   | E (90°)    | SE (135°)  |
| a | 270°–90°   | 315°–135°  | 0°–180°    | 45°–225°   |

|   | <b>ES0</b> | <b>SES</b> | <b>NWW</b> | <b>NEN</b> |
|---|------------|------------|------------|------------|
| ⊥ | S (180°)   | SW (225°)  | W (270°)   | NW (315°)  |
| a | 90°–270°   | 135°–315°  | 180°–360°  | 225°–45°   |

Na płaszczyzny: NEN, EN0, SEN zbierany jest wiatr z azymutów “a” przez 0°, na płaszczyznę NEE przez 90°, a na płaszczyznę NWW przez 270°.

Przetwarzanie rzeczywistych ciągów meteorologicznych prędkości i kierunku wiatru dotyczy pełnej identyfikacji tego parametru. W prezentowanej w pracy analizie ciepłno-przepływowej obiektów budowlanych wykorzystywana jest jedynie składowa deterministyczna parametru, podobnie jak w przypadku temperatury otoczenia i promieniowania słonecznego.

Identyfikacja kierunku i prędkości wiatru została wykonana z uwagi na wpływ parametru na procesy ciepłno-przepływowe, zachodzące w obiektach budowlanych. Dlatego też, jak zaznaczono powyżej, z niezależnych dla prędkości wiatru i kierunku ciągów IMGW zbudowano kierunkowe ciągi meteorologiczne. Wyznaczają one osiem niezależnych, prostopadłych do kierunku oddziaływania składowej normalnej wiatru, płaszczyzn. Mogą być one traktowane, jak wskazano powyżej, jako płaszczyzny przegród budynków.

Metodologię konstruowania średniej doby i wyznaczania składowej losowej przedstawiona jest w [31].

### 3.2.2. Składowa deterministyczna prędkości i kierunku wiatru

Podstawowym zabiegiem identyfikacji każdego z parametrów klimatu jest określenie przebiegu funkcji składowej deterministycznej i wydzielenie składowej losowej czyli ciągu szumów [30, 63]. W tym celu uśrednia się miesięczne przebiegi poszczególnych parametrów, w tym wypadku z 10 lat, a następnie wyznacza uśredniony po 10 latach i miesiącu, przebieg dobowy. Rzeczywiste prędkości wiatru odczytywane są przez całą dobę, w odstępach trzygodzinnych. Ciągi prędkości kierunkowych wyłoniono z danych IMGW. Mają one identyczną z nimi budowę. Dokonuje się interpolacji liniowej zmiennych trzygodzinnych na godzinne, tak by doba oparta była na 24. punktach pomiarowych. Obliczona, na podstawie zinterpolowanych zbiorów meteorologicznych, średnia doba wyznacza niezmienny charakter przebiegu parametru w kolejnych dobach miesiąca i lat. Przebieg średniej doby otrzymano przy założeniu, że rozkład zmiennych godzinowych jest reprezentowany przez rozkład Weibulla. Stąd też potrzeba wyznaczenia 24 rozkładów gęstości dla

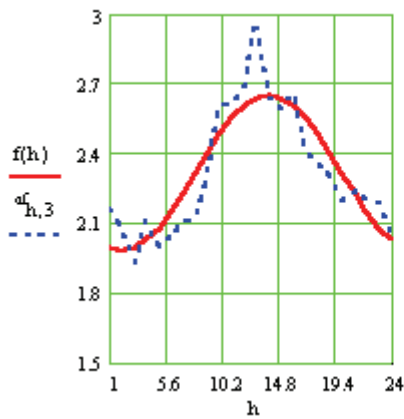
każdego miesiąca i kierunku w celu obliczenia współczynnika kształtu  $k$  i skali  $c$  ([31], wzór (3.2), tablica 2). Następnie aproksymowano otrzymany dobowy przebieg parametru funkcją trygonometryczną o postaci (3.10). Funkcja ta opisuje średnie wahania składowej normalnej wiatru w ciągu doby. Wartości funkcji podaje tablica 3.2. Rysunek 3.5 przedstawia doby miesięczne dla marca i września, przy wszystkich ośmiu kierunkach napływu wiatru.

$$\langle V(t) \rangle = \bar{v} + A_v \sin \left[ \varpi (t + t_{t\varphi}) \right]; \quad \varpi = 2\pi/\tau_d; \quad \tau_d = 24 \text{ h} \quad (3.10)$$

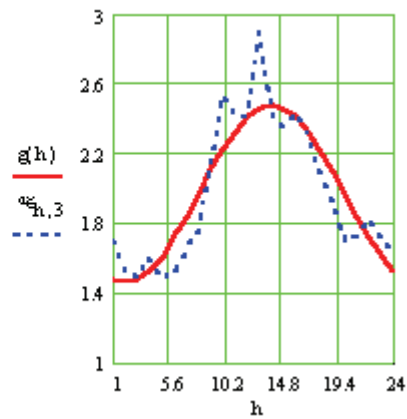
gdzie:  $\bar{v}$  – wartość średnia miesięczna parametru, w tym wypadku odniesiona do wiatru,  $A_v$  – amplituda,  $t_{t\varphi}$  – przesunięcie fazowe,  $t$  – czas bieżący liczony w godzinach.

**ES0**

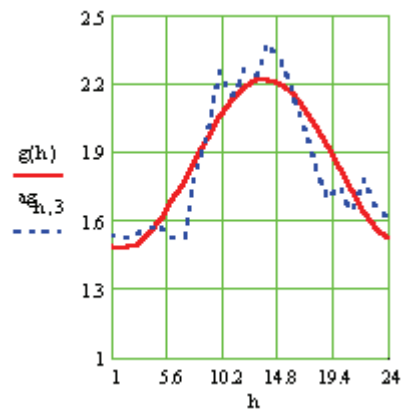
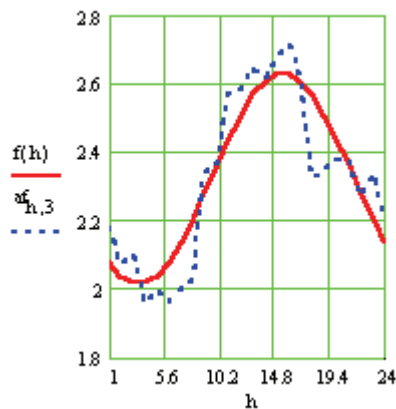
**marzec**



**wrzesień**

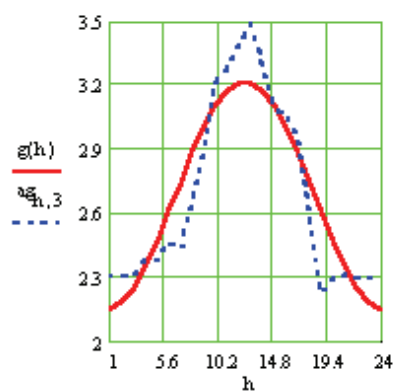
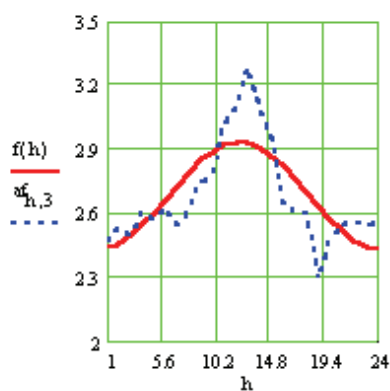


**SEN**

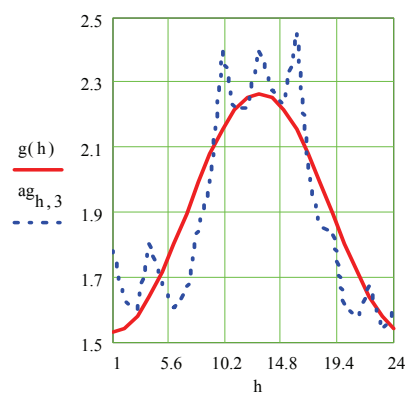
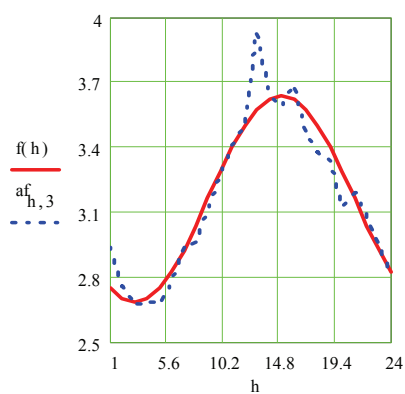




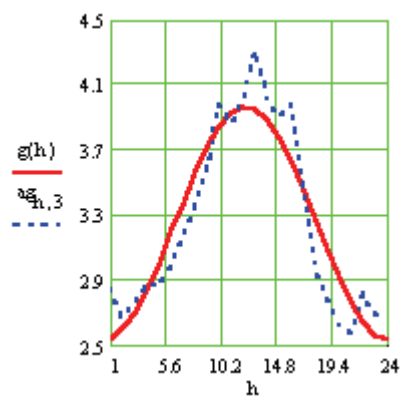
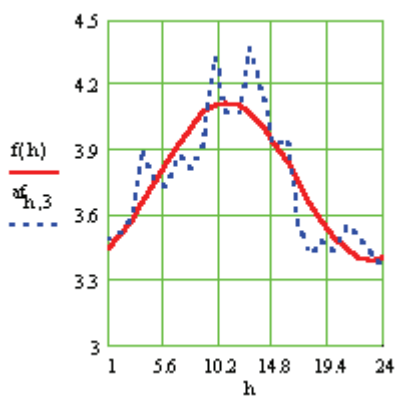
## SES



## NEE



## NWW



Rys. 3.5. Średnia doba składowej normalnej prędkości wiatru aproksymowana funkcją harmoniczną dla wszystkich ośmiu kierunków w miesiącu marcu – lewa kolumna i wrześniu – prawa kolumna.  $f(h)$  – przebieg funkcji harmoniczej,  $af_{h,3}$  – wartości uśrednione po latach i miesiącu

Tablica 3.2. Wartości średniej miesięcznej doby składowej normalnej prędkości wiatru, opisaną funkcją harmoniczną dla ośmiu kierunków napływu

| Miesiąc | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 |
|---------|----|----|----|----|----|----|
|---------|----|----|----|----|----|----|

### Kierunek napływu wiatru

#### NEN

|                |       |       |       |       |       |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$      | 3,502 | 2,936 | 3,311 | 2,970 | 2,439 | 2,745 |
| $A_v$          | 0,255 | 0,225 | 0,515 | 0,807 | 0,656 | 0,866 |
| $t_{t\varphi}$ | -7,50 | -9,00 | -6,75 | -7,75 | -8,00 | -7,25 |
| e              | 0,158 | 0,562 | 0,237 | 0,592 | 0,239 | 0,172 |

#### NES

|                |        |       |       |       |       |       |
|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$      | 2,708  | 2,983 | 2,941 | 2,316 | 2,519 | 1,840 |
| $A_v$          | 0,114  | 0,174 | 0,376 | 0,560 | 0,708 | 0,505 |
| $t_{t\varphi}$ | -10,25 | -9,50 | -8,25 | -7,50 | -7,50 | -7,25 |
| e              | 0,161  | 0,185 | 0,286 | 0,395 | 0,481 | 0,266 |

#### EN0

|                |       |       |       |       |       |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$      | 2,481 | 2,316 | 2,435 | 2,755 | 2,381 | 2,304 |
| $A_v$          | 0,196 | 0,288 | 0,269 | 0,347 | 0,461 | 0,460 |
| $t_{t\varphi}$ | -7,25 | -8,25 | -7,00 | -8,50 | -8,25 | -8,50 |
| e              | 0,933 | 0,542 | 0,907 | 0,378 | 0,233 | 0,376 |

#### ES0

|                |       |       |       |       |       |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$      | 2,562 | 2,136 | 2,319 | 2,198 | 1,967 | 1,668 |
| $A_v$          | 0,113 | 0,192 | 0,335 | 0,602 | 0,739 | 0,522 |
| $t_{t\varphi}$ | -7,75 | -8,00 | -8,00 | -7,25 | -7,25 | -7,50 |
| e              | 0,302 | 0,349 | 0,340 | 1,230 | 0,793 | 0,324 |

#### SEN

|                |        |        |       |       |       |       |
|----------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$      | 1,989  | 2,411  | 2,326 | 2,705 | 2,242 | 1,974 |
| $A_v$          | 0,097  | 0,169  | 0,308 | 0,273 | 0,342 | 0,377 |
| $t_{t\varphi}$ | -10,50 | -10,75 | -9,50 | -7,25 | -8,00 | -7,50 |
| e              | 0,063  | 0,077  | 0,250 | 0,340 | 0,063 | 0,342 |

**SES**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 3,428 | 2,510 | 2,683 | 2,484 | 1,835 | 2,253 |
| $A_v$       | 0,101 | 0,290 | 0,248 | 0,692 | 0,558 | 0,562 |
| $t_{t\phi}$ | -5,75 | -8,00 | -6,25 | -6,00 | -7,25 | -6,75 |
| e           | 0,361 | 0,256 | 0,541 | 0,529 | 0,304 | 0,450 |

**NEE**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 2,659 | 3,352 | 3,165 | 2,594 | 2,678 | 2,013 |
| $A_v$       | 0,027 | 0,236 | 0,476 | 0,524 | 0,570 | 0,372 |
| $t_{t\phi}$ | -2,25 | -9,75 | -9,00 | -7,50 | -7,75 | -7,50 |
| e           | 0,347 | 0,179 | 0,251 | 0,495 | 0,370 | 0,554 |

**NWW**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 4,374 | 3,484 | 3,756 | 3,265 | 2,479 | 3,040 |
| $A_v$       | 0,201 | 0,206 | 0,364 | 0,839 | 0,738 | 0,965 |
| $t_{t\phi}$ | -9,00 | -7,00 | -5,00 | -7,00 | -7,00 | -6,50 |
| e           | 0,402 | 0,810 | 0,457 | 0,461 | 0,436 | 0,461 |

---

|                |    |    |    |    |    |    |
|----------------|----|----|----|----|----|----|
| <b>Miesiąc</b> | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 |
|----------------|----|----|----|----|----|----|

---

**Kierunek napływu wiatru****NEN**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 2,505 | 2,302 | 2,458 | 2,617 | 2,952 | 3,096 |
| $A_v$       | 0,773 | 0,603 | 0,615 | 0,356 | 0,311 | 0,279 |
| $t_{t\phi}$ | -7,50 | -7,75 | -6,50 | -7,00 | -6,50 | -3,00 |
| e           | 0,196 | 0,236 | 0,497 | 0,476 | 0,099 | 0,803 |

**NES**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 1,626 | 1,776 | 1,757 | 2,611 | 2,666 | 2,537 |
| $A_v$       | 0,372 | 0,456 | 0,397 | 0,377 | 0,167 | 0,041 |
| $t_{t\phi}$ | -7,00 | -7,00 | -7,00 | -6,75 | -7,50 | 8,75  |
| e           | 0,208 | 0,351 | 0,316 | 0,369 | 0,354 | 0,110 |

**EN0**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 2,298 | 2,095 | 1,886 | 1,754 | 2,283 | 2,192 |
| $A_v$       | 0,551 | 0,271 | 0,404 | 0,354 | 0,234 | 0,152 |
| $t_{t\phi}$ | -9,50 | -7,25 | -8,25 | -9,00 | -5,50 | -5,00 |
| e           | 0,546 | 0,602 | 0,714 | 0,625 | 0,538 | 0,542 |

**ES0**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 1,759 | 1,632 | 1,971 | 2,177 | 2,626 | 2,472 |
| $A_v$       | 0,417 | 0,447 | 0,505 | 0,260 | 0,103 | 0,067 |
| $t_{t\phi}$ | -7,00 | -7,75 | -8,00 | -6,75 | -3,50 | -7,50 |
| e           | 0,579 | 0,796 | 0,676 | 0,434 | 0,220 | 0,225 |

**SEN**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 1,982 | 1,871 | 1,854 | 1,820 | 2,370 | 2,021 |
| $A_v$       | 0,340 | 0,387 | 0,373 | 0,276 | 0,230 | 0,115 |
| $t_{t\phi}$ | -9,75 | -7,0  | -7,75 | -9,75 | -6,00 | -8,25 |
| e           | 0,259 | 0,307 | 0,325 | 0,072 | 0,118 | 0,109 |

**SES**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 2,393 | 2,212 | 2,680 | 2,664 | 3,269 | 3,078 |
| $A_v$       | 0,579 | 0,525 | 0,537 | 0,334 | 0,305 | 0,011 |
| $t_{t\phi}$ | -6,75 | -6,50 | -6,50 | -6,25 | -7,25 | -7,25 |
| e           | 0,540 | 0,765 | 0,674 | 0,397 | 0,412 | 0,152 |

**NEE**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 1,795 | 1,917 | 1,899 | 2,710 | 2,920 | 2,671 |
| $A_v$       | 0,303 | 0,316 | 0,367 | 0,457 | 0,369 | 0,127 |
| $t_{t\phi}$ | -8,75 | -7,25 | -7,00 | -8,00 | -9,00 | -4,75 |
| e           | 0,276 | 0,282 | 0,481 | 0,220 | 0,366 | 0,226 |

**NWW**

|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{v}$   | 2,961 | 2,770 | 3,248 | 3,404 | 3,827 | 3,903 |
| $A_v$       | 0,778 | 0,734 | 0,717 | 0,513 | 0,317 | 0,056 |
| $t_{t\phi}$ | -6,75 | -6,50 | -6,25 | -6,00 | -6,50 | -9,50 |
| e           | 0,542 | 0,811 | 0,970 | 1,053 | 0,926 | 0,799 |

e [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] – błąd dopasowania.

**3.2.3. Relacje potęgowe składowych funkcji harmonicznego**

Wartości zawarte zarówno w tablicy 3.2 jak i na rys. 3.5 odnoszą się do pomiarów prędkości wiatru, dokonanych w stacji IMGW, na wysokości 10 m nad powierzchnią gruntu. Posługując się potęgową zależnością Suttona (3.9), [102] stworzono ciągi zmiennych kierunkowych prędkości wiatru, na wysokości od 3 do 30 metrów, przy chropowatości terenu właściwej dla zabudowy miejskiej (współczynnik potęgowy  $N = 0,35$  (3.9) [42, 43, 84]). Budowa tych ciągów jest identyczna z budową ciągów IMGW. Dlatego też funkcja dana zależnością (3.10) aproksymuje także, wyliczone według przedstawionej powyżej procedury, średnie doby w kolej-

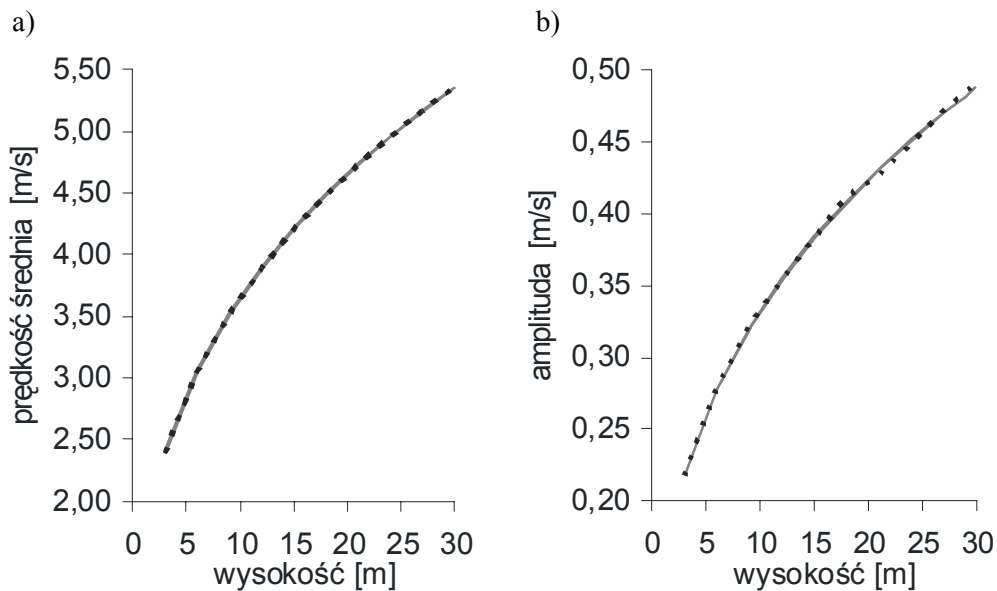
nych miesiącach na 10 wysokościach „z”, poczynając od 3 m, a kończąc na 30 m – co 3 m. Ograniczono się do 30 m wysokości nad poziomem gruntu, ponieważ budynki, przekraczające tę wysokość, wyposażone są w układy wentylacji wymuszonej i zjawisko infiltracji traci swoje znaczenie.

Prędkość średnia i amplituda:  $\bar{v}(z)$  i  $A_v(z)$  w równaniu (3.10) obliczana jest na dowolnej wysokości „z” nad poziomem gruntu z zależności (3.11):

$$\bar{v}(z) = \bar{v}(10) \left( \frac{z}{10} \right)^{0,35}; \quad A_v(z) = A_v(10) z^{0,35} \quad (3.11)$$

gdzie:

- $\bar{v}(z)$  – wartość średnia parametru na dowolnej wysokości wybranej z przedziału 0–30 m nad poziomem gruntu,
- $\bar{v}(10)$  – wartość średnia parametru z danych IMGW, których pomiar w Warszawie odbywa się 10 m nad poziomem gruntu na przestrzeni niezabudowanej o podłożu trawiastym,
- $A_v(z)$  – amplituda funkcji harmonicznego opisującej średnią dobę na dowolnej wysokości wybranej z przedziału 0–30 m nad poziomem gruntu,
- $A_v(10)$  – amplituda funkcji harmonicznego opisującej średnią dobę obliczoną na wysokości pomiaru IMGW – 10 m.



Rys. 3.6a i b. Wartości składowych funkcji harmonicznego  $v(z)$ ,  $A_v(z)$  gdzie: linię ciągłą obliczono z równania (3.11), a linię przerywaną otrzymano z przetworzonych danych pomiarowych



## 4. Wpływ wiatru gradientowego na strumień objętości powietrza wentylacyjnego

### 4.1. Założenia modelowe

Bieżący rozdział zawiera wyniki obliczeń, które dotyczą jedynie intensywności wymiany powietrza w pomieszczeniu z grawitacyjnym systemem wentylacyjnym [21]. Przedstawiony tu przykład ma jedynie ilustrować przeprowadzoną identyfikację prędkości i kierunku wiatru, w zakresie jego składowej deterministycznej, a wyniki obliczeń dostarczyć informacji o zmianie intensywności wymiany powietrza zależnej nie tylko od wysokości budynku, ale także zmieniającej się w ciągu doby. Zmiana ilości przepływającego przez pomieszczenie powietrza jest głównie rozpatrywana pod kątem oddziaływania wiatru na różnej wysokości nad poziomem gruntu.

Intensywność wymiany powietrza obliczono w wyizolowanym pomieszczeniu, które jest usytuowane kolejno na 9-iu piętrach 30 metrowego budynku. W algorytmie obliczeniowym użyto parametrów zidentyfikowanej, składowej normalnej, kierunkowej prędkości wiatru wraz z zależnością Suttona (3.9).

Wymianę powietrza wentylacyjnego liczone w pomieszczeniu o powierzchni  $20 \text{ m}^2$  z oknem, które – w kolejnych cyklach obliczeniowych – przyjmuje orientację zgodną z 8-oma kierunkami napływu wiatru na płaszczyznę ściany domu. Kierunki wiatru na fasady budynku przyjęto zgodnie z tablicą 3.1. Wymiana powietrza w badanym pomieszczeniu odbywa się w wyniku działania systemu wentylacji grawitacyjnej. Świeże powietrze doprowadzane jest do pomieszczenia przez okno, w wyniku występowania infiltracji. Wylot zużytego powietrza następuje kanałem wyprowadzonym nad poziom dachu. Nie występuje przepływ powietrza pomiędzy pomieszczeniem a klatką schodową, stąd oś obojętną  $H_D$  przyjęto na poziomie dachu budynku [54, 95, 97].

Przedstawiony poniżej algorytm obliczeń dotyczy wymiany powietrza w pomieszczeniu, przy założeniu stałej temperatury wewnętrznej. Temperatura otoczenia podobnie jak prędkość wiatru jest uśredniona dla miesiąca i zmienna w ciągu doby [30].

Strumień masowy powietrza, które przepływa przez szczeliny okienne, opisany jest następującą zależnością:

$$\dot{V}_m = \left( \frac{|p - p_i|}{10} \right)^{2/3} \cdot a_l \cdot l \cdot F_{ok} \cdot \rho_o \quad (4.1)$$

a strumień masowy powietrza, które przepływa przez kanał wentylacyjny wynosi:

$$\dot{V}_m = a_k \cdot F_k \cdot \rho_i \cdot (|p_i - p_o|)^{1/2} \quad (4.2)$$

Ciśnienia  $p_i$  i  $p_o$  to – odpowiednio – ciśnienie wewnątrz pomieszczenia oraz ciśnienie statyczne w swobodnym strumieniu na wysokości dachu –  $H_D$ , natomiast ciśnienie sumaryczne  $p$  wyraża się następująco:

$$p = p_o + C_p \cdot \frac{\rho_o \cdot v_z^2}{2} + (H_D - H) \cdot g \cdot (\rho_o - \rho_i) \quad (4.3)$$

Wartość współczynnika oporu w kanale wentylacyjnym –  $a_k$  wyliczono z poniższej zależności:

$$a_k = \frac{3600}{\sqrt{0,5 \cdot \rho_i \cdot \left[ \frac{\lambda_k \cdot l_k}{D_h} + \zeta \right]}} \quad (4.4)$$

Ostatecznie otrzymano równanie bilansowe eliminując z równań (4.1) i (4.2) człon  $|p_i - p_o|$ :

$$A \cdot \dot{V}_m^2 + B \cdot \dot{V}_m^{1,5} - D = 0 \quad (4.5)$$

w którym kolejne wyrazy dane są następującymi zależnościami:

$$A = \frac{[0,381 \cdot (H_D - H) + 1]}{2 \cdot (3600 \cdot F_k)^2} \cdot \left( \frac{R}{p_o} \right)^2 \cdot T_o \cdot T_i$$

$$B = \frac{10 \cdot T_o^{2,5}}{(a_1 \cdot l \cdot F_{ok})^{1,5}} \cdot \left( \frac{R}{p_o} \right)^{2,5} \quad (4.6)$$

$$D = C_p \cdot \frac{v_z^2}{2} \cdot \left( \frac{H}{10} \right)^{0,7} + g \cdot (H_D - H) \cdot \left( 1 - \frac{T_o}{T_i} \right)$$

Obliczenia przeprowadzono wykorzystując następujące dane:

- $a_1$  – 2,20 [(h·Pa<sup>2/3</sup>)<sup>-1</sup>], współczynnik przepływu przez szczelinę,
- $l$  – 2,33 [m·m<sup>-2</sup>], łączna długość nieszczelności okna na 1m<sup>2</sup> jego powierzchni,
- $F_{ok}$  – 8 [m<sup>2</sup>], powierzchnia okien,
- $F_k$  – 0,01 [m<sup>2</sup>], powierzchnia kanału wentylacyjnego,
- $T_o$  – [K], temperatura zewnętrzna opisana funkcją harmoniczną, (3.10),
- $T_i$  – 293 [K], temperatura wewnętrzna odpowiadająca temperaturze komfortu,
- $R$  – 289 [J·mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>], stała gazowa,



- $C_p$  – 0,9, bezwymiarowy współczynnik konwersji ciśnienia dynamicznego, [4, 6, 7],
- $\lambda_k$  – 0,0381, bezwymiarowy współczynnik strat liniowych przy przepływie przez kanał wentylacyjny, obliczony według formuły Colebrook’a i White’a,
- $l_k$  –  $(H_D - H)$  [m], długość kanału wentylacyjnego,
- $D_h$  – 0,1 [m], średnica hydrauliczna kanału,
- $\zeta$  – 1, współczynnik oporów miejscowych [98].

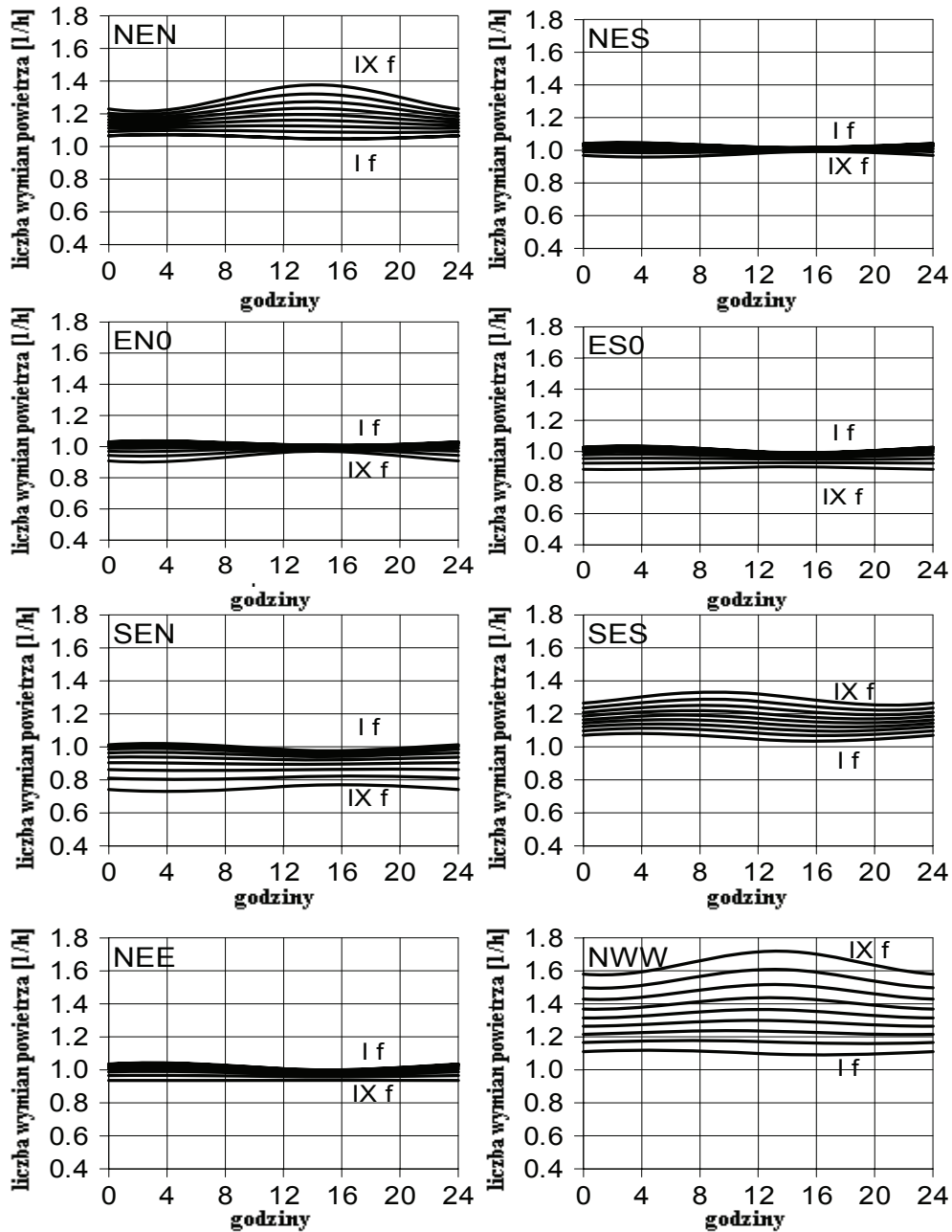
Zależność (4.5) opisuje strumień masowy powietrza w analizowanym pomieszczeniu, przy zachowaniu powyżej ustalonych założeń i warunków. Przy zmiennej, nawet nieznacznie, budowie systemu wentylacyjnego czy różnym, od dotychczas założonego, rozkładzie ciśnień – równanie (4.5) będzie przyjmować inną postać, tak jak i zależności (4.6), która opisuje współczynniki równania.

Wzór Suttona posłużył do wyliczenia składowej normalnej prędkości wiatru kierunkowego –  $v_z$ , na kolejnych piętrach budynku, określanych poprzez wysokość  $H$  [m]. Budynek znajduje się w terenie zabudowanym. Chropowatość podłoża terenu określana jest wykładnikiem potęgowym równym 0,35.

#### 4.2. Wyniki obliczeń

Posługując się równaniem (4.5) wygenerowano ciągi strumienia masowego powietrza, wykorzystując ciągi meteorologiczne temperatury zewnętrznej i wiatrów, sklasyfikowanych według kierunków. Następnie wyznaczono statystycznie średnie dobowe strumieni powietrza w rozpatrywanych miesiącach i przyporządkowano im funkcję harmoniczną. Opisana powyżej metoda generowania ciągów strumieni powietrza jest żmudna i pracochłonna, wymaga dodatkowo dysponowania ciągami meteorologicznymi obu parametrów klimatu, tj. temperaturą i wiatrem. Dlatego też można wykorzystać uprzednio otrzymane zależności na wartości średnie temperatury oraz wiatru i obliczyć dobowe przebiegi strumieni powietrza wentylacyjnego. Wartości funkcji temperatury zawiera tablica 1 [28].

Okazało się, iż wyniki obliczeń, otrzymane przez wskazane powyżej dwie metody, różnią się pomiędzy sobą. Wartości strumienia powietrza, uzyskane z wykorzystaniem wynikowej funkcji harmonicznym wiatru i temperatury otoczenia, są niższe od tych, otrzymanych na drodze statystycznego uśredniania. Lepsze rezultaty przynosi generowanie średnich wartości strumienia, przy udziale funkcji opisującej  $v_z^2$ , ponieważ ciśnienie “p” w równaniu (4.3) jest m.in. funkcją  $v_z^2$ . Stąd też wyznaczono funkcje harmoniczne dla kwadratu prędkości  $v_z^2$ . W obliczeniach strumienia powietrza zastąpiły one funkcje wyznaczone pierwotnie dla prędkości wiatru –  $v_z$ . Masowe strumienie powietrza, otrzymane, z wykorzystaniem funkcji wyznaczonej dla kwadratu prędkości składowej wiatru kierunkowego, kształtują się w ciągu doby niemal identycznie jak te, otrzymane na drodze uśredniania statystycznego. Relacja ta zachowana jest na kolejnych piętrach budynku we wszystkich rozpatrywanych miesiącach.



Rys 4.1. Dobowe przebiegi liczby wymiany powietrza wentylacyjnego na kolejnych piętrach budynku, przy ośmiu orientacjach okna, zgodnych z kierunkami napływu wiatru w styczniu

Wartości współczynników funkcji kwadratowej zamieszczono w [29], natomiast wartości współczynników funkcji, opisującej strumienie masowe powietrza wentylacyjnego na kolejnych piętrach, dostępne są w tablicach 2 i 3 [21].

Liczbę wymian powietrza w pomieszczeniu obliczono dla ośmiu kierunków napływu wiatru, zgodnie z znakowaniem przyjętym w tablicy 3.1. Ich dzienne przebiegi w styczniu przedstawia rys. 4.1, a w kwietniu – rys. 4.2.

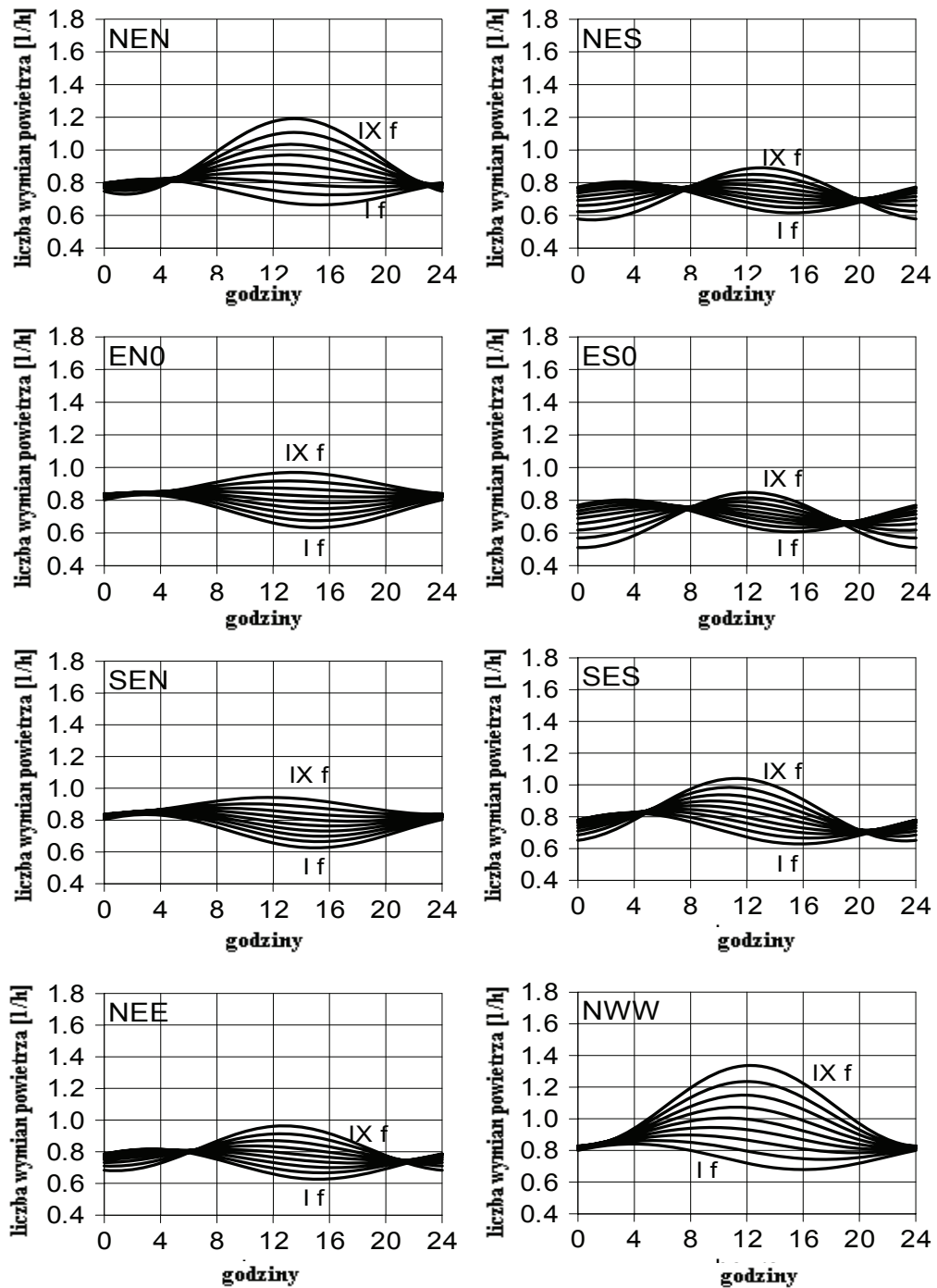
W styczniu intensywność wymiany powietrza, jak i jej dobowy przebieg na kolejnych piętrach, zależy w głównej mierze od kierunku napływu i średniej dobowej prędkości wiatru, oddziałującego na szczelinę okienną, pomimo że w tym miesiącu średnia dzienna różnica temperatur pomiędzy otoczeniem a ogrzewanym pomieszczeniem, wynosi aż 23°C. W styczniu największą prędkość posiadają wiatry NWW – 4,37 m·s<sup>-1</sup>, działające na płaszczyznę W (270°), zbierane z azymutów 180°–360°. Jest to kierunek, który w cyklu rocznym generalnie charakteryzuje się najwyższą prędkością, a jej procentowy udział jest także najwyższy i wynosi 25,3%.

Także wiatry wiejące z kierunków NEN i SES, których średnie prędkości wynoszą odpowiednio 3,50 m·s<sup>-1</sup> i 3,43 m·s<sup>-1</sup>, wytwarzają różnicę ciśnień dominującą nad tą, wynikającą z różnicy gęstości powietrza zewnętrznego i wewnętrznego. Dopiero pozostałe kierunki, tj. NES, NEE, ES0, EN0 i SEN, zmieniają sytuację i spadek ciśnienia, który wynika z różnicy gęstości powietrza góruje nad ciśnieniem dynamicznym. Prędkości wiatru zawierają się wtedy w zakresie od 2,71 m·s<sup>-1</sup> dla NES do 1,99 m·s<sup>-1</sup> dla kierunku SEN – (rys. 4.3a). W konsekwencji, oddziaływanie wiatru napływającego na płaszczyzny NEN, NWW i SES sprawia, że mimo zmniejszającej się wraz z wysokością różnicy ciśnień, ciśnienie całkowite jest na wyższych piętrach w rozpatrywanych przypadkach większe.

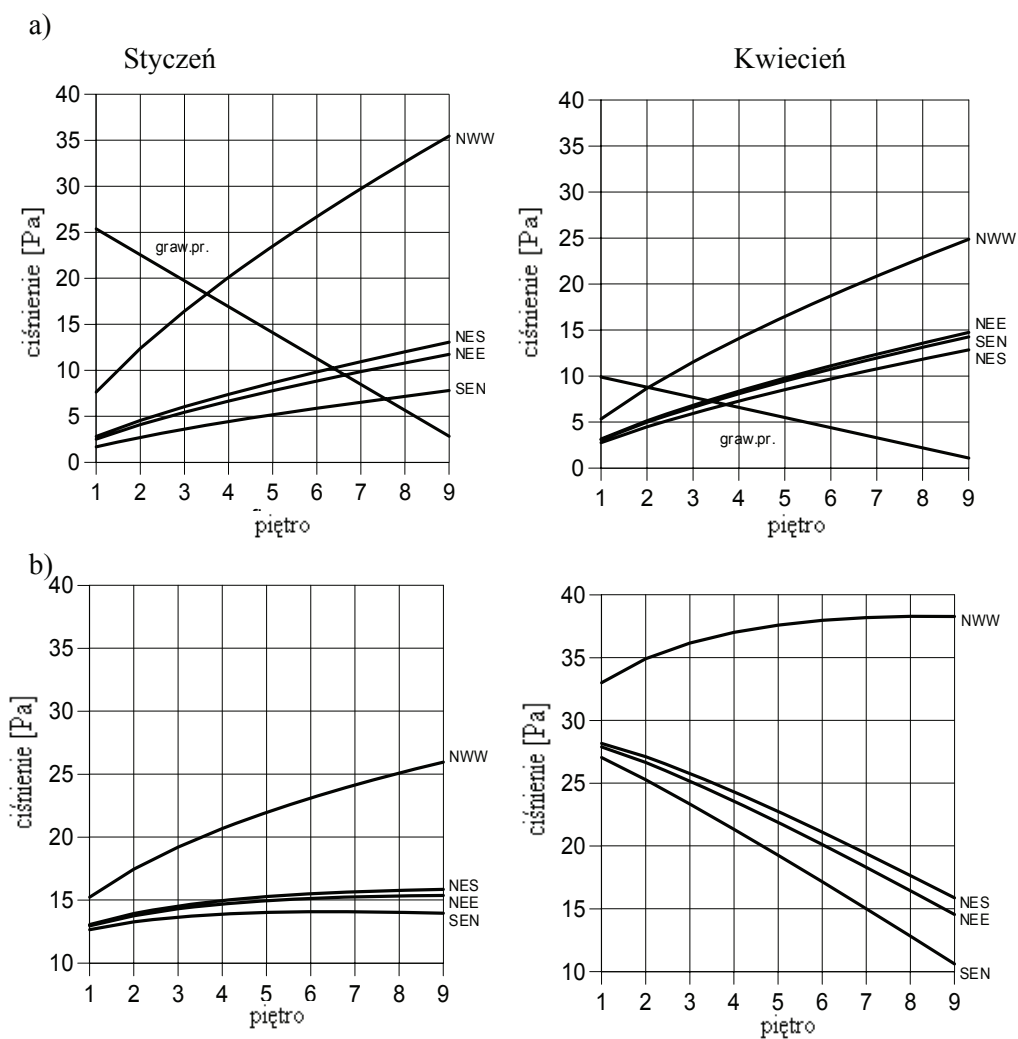
Wymiana powietrza w kwietniu jest generalnie niższa, niż w styczniu. Różnica w gęstości powietrza nie jest znaczna, bo i średnia różnica pomiędzy temperaturą w pomieszczeniu a tą panującą na zewnątrz, wynosi 7,3°C, z amplitudą równą 3,7°C. Najwyższą średnią prędkość w tym miesiącu odnotowuje się także dla wiatrów zbieranych z azymutów 180°–360°, podobnie jak w styczniu, jest to wiatr NWW – 3,27 m·s<sup>-1</sup>, z amplitudą 0,84 m·s<sup>-1</sup>.

Najniższą wartością charakteryzują się wiatry ESO z zakresu 90°–270° rzutowane na płaszczyznę S – 180°. Ich średnia prędkość wynosi 2,20 m·s<sup>-1</sup> i tu także występują znaczące wartości amplitudy równe 0,60 m·s<sup>-1</sup>. Intensywność wymiany powietrza na poszczególnych piętrach zmienia się w ciągu doby. Wykresy na rys. 4.3 pokazują, jak kształtują się proporcje pomiędzy ciśnieniem, pochodzącym od naporu wiatru i tym wytwarzanym przez różnicę gęstości powietrza. Należy pamiętać, że analiza prowadzona jest z wykorzystaniem wartości średnich, stąd też chwilowe wartości wymiany powietrza mogą różnić się od średnich, które są stałe w ciągu miesiąca.

Otrzymane wyniki obliczeń wskazują na celowość dokładnego i poprawnego opisu parametrów klimatu w modelach matematycznych, opisujących także procesy ciepło-przepływowe, zachodzące w obiektach budowlanych.



Rys. 4.2. Dobowe przebiegi liczby wymiany powietrza wentylacyjnego na kolejnych piętrach budynku, przy ośmiu orientacjach okna, zgodnych z kierunkami napływu wiatru w kwietniu



Rys. 4.3 Przebieg ciśnień na poszczególnych piętrach budynku  
 a) ciśnienie grawitacyjne i dynamiczne, b) ciśnienie całkowite



## 5. Uproszczony model naturalnej wymiany powietrza w jednostrefowych i dwustrefowych obiektach budowlanych, rozwiązanie analityczne

### 5.1. Wprowadzenie

Do niedawna obowiązywał pogląd, że losowy charakter parametrów klimatu dyskredytuje stosowanie wentylacji naturalnej. W utwierdzeniu tego poglądu miał też swój udział ówczesny rozwój wentylacji mechanicznej i klimatyzacji. Oba te systemy istotnie posiadają przewagę nad naturalną wymianą powietrza, ponieważ rezultaty ich działania są przewidywalne i ściśle określone. Funkcjonowanie pewnej klasy budynków, w których wymagane jest utrzymywanie wysokiej jakości mikroklimatu, nie jest możliwe bez stosowania wentylacji mechanicznej bądź nawet klimatyzacji. Istnieją natomiast obiekty budowlane, nawet w naszej strefie klimatycznej, w których wentylacja naturalna spełnia swoje zadanie przez wiele miesięcy w roku. W pozostałych okresach może ona pracować w układzie skojarzonym z wentylacją mechaniczną, tworząc hybrydowy system wymiany powietrza. Koszt instalacji takiego systemu wzrasta do 30%, w stosunku do konwencjonalnych rozwiązań. Jednak spadek obciążeń finansowych, z tytułu eksploatacji systemu hybrydowego, pokrywa z nawiązką inwestycję [105]. Ponadto powstanie nowoczesnych technik wspomagających projektowanie, jak np. specjalistyczne oprogramowania komputerowe, a także rozwój technologii systemów kontrolno-sterujących, doprowadził do sytuacji, kiedy systemy te mogą być uważane za równie skuteczne jak mechaniczne. Udział w tym sukcesie ma także głębsze rozumienie przepływu powietrza i jego charakteru w procesie naturalnej wymiany. Pogłębiona wiedza jest rezultatem badań naukowych, prowadzonych nad fizyką przepływu, głównie za pomocą eksperymentów laboratoryjnych, wspartych symulacjami komputerowymi.

Opisywane w literaturze przedmiotu metody obliczania strumienia powietrza wentylacyjnego w obiektach, dotyczą głównie budynków z narzuconą, normowo stałą, temperaturą wewnętrzną. A przecież temperatura ta kształtuje się w wyniku procesów ciepłno-przepływowych, zachodzących pomiędzy budynkiem a jego otoczeniem. Te procesy z kolei kształtują nie tylko wewnętrzne źródła ciepła oraz temperatura zewnętrzna, ale także pozostałe parametry pogody, zmienne nie tylko w okresie miesiąca ale i doby. Stąd też, ustalenie a priori jej wartości, przy naturalnej wymianie powietrza, szczególnie poza sezonem grzewczym, obarczone jest zazwyczaj błędem. Ponadto temperatura wewnętrzna zależy – jak już podkreślano na początku pracy – także od lokalizacji budynku, warunków eksploatacyjnych, izolacyjności, orientacji i geometrii przegród budowlanych. Dlatego też poprawny proces szacowania wymiany powietrza wentylacyjnego w budynku jest trudny i złożony.

Wykonuje się go we wstępnej fazie projektu. Ewentualne, późniejsze korekty nie zawsze przynoszą pożądane efekty.

W dalszym ciągu istnieje więc potrzeba kompleksowego i poprawnego modelowania procesów ciepłno-przepływowych, zachodzących w obiektach budowlanych, mimo możliwości ich symulowania z wykorzystaniem szeregu mniej lub bardziej zaawansowanych komercyjnych pakietów numerycznych. Modele matematyczne, rozwiązywalne analitycznie, które opisują wspólne i wzajemnie zależne zachodzenie tych procesów są nadal pożądanym narzędziem badawczym. Służą one szerokiej i dogłębnej analizie wzajemnych oddziaływań i wpływów, nawet w przypadku nałożonych na model uproszczeń, które oczywiście nie mogą zniekształcać opisywanego procesu. Do tej klasy narzędzi należą matematyczne modele stworzone przez Y. Li i A. Delsante. Podstawową zaletą tych modeli jest matematyczny opis naturalnej wymiany powietrza w budynku, której intensywność wynika także z oporu cieplnego jego przegród. Opis modelu uwzględnia więc pośrednio wymianę ciepła przez przegrody budynku. Rolę wymuszenia grają parametry klimatu. Wynikiem rozwiązania równań bilansowych, tworzących modele Li, Delsante, są wielkości różnicujące niezależnie wpływ zarówno parametrów klimatu, jak i izolacyjności przegród zewnętrznych obiektu, na intensywność wymiany powietrza wentylacyjnego. W przypadku jednakowych warunków klimatycznych i eksploatacyjnych, intensywność naturalnej wymiany powietrza w budynkach determinuje opór cieplny ich przegród zewnętrznych. I chociaż uzyskane informacje dotyczą stanu ustalonego, to jednak modele Li, Delsante należą do tych wyjątków, które są w stanie zaspokoić, w pewnym zakresie, oczekiwania badaczy tego problemu z racji swojej kompleksowości. Przyjęty opis modelu zezwala także na badanie przepływów powietrza, tłumionych wiatrem przeciwnym lub wręcz zmieniających kierunek przepływu na odwrotny, właśnie pod wpływem wiatru przeciwnego. Ponadto budowa modeli, w szczególności dla obiektu dwustrefowego, umożliwia uzyskanie wielokrotnych miejsc zerowych dla każdej z rozpatrywanych tu funkcji. Każda z funkcji opisuje inny charakter przepływu powietrza wentylacyjnego, który jest zdeterminowany kierunkiem i prędkością napływu wiatru. Histerezę przepływu uzyskuje się przy przyjętych warunkach początkowych rozwiązywania danej funkcji głównie dla wiatru przeciwnego.

Analiza obu modeli Li, Delsante doprowadziła do modyfikacji ich matematycznego opisu. W ramach analizy modelu uzyskano także rozwiązanie analityczne, w przypadku modelu budynku jednostrefowego. Natomiast w artykule źródłowym [74] podano jedynie wynik rozwiązania równania, otrzymany z zastosowaniem pakietu Mathematica. W przypadku modelu dwustrefowego rozwiązanie możliwe jest przy użyciu typowych algorytmów numerycznych, zaś analityczne – tylko w szczególnych przypadkach.

Wyniki obliczeń, przedstawione w bieżącym rozdziale, uzyskano przy zastosowaniu już zmodyfikowanych, na potrzeby prezentowanej pracy, matematycznych modeli Li, Delsante [73, 74]. Modyfikację równań bilansowych przeprowadzono w celu głębszej analizy wyników obliczeń. Zabieg modyfikacji polegał na aproksymowaniu funkcjami trygonometrycznymi parametrów klimatu. W modelu źródłowym parametry przyjmują wartości stałe. Parametry klimatu należy trakto-



wać, w dalszym ciągu, jako wymuszenie procesów wymiany ciepła i powietrza w budynku, a rezultatem rozwiązania równań, opisujących te relacje, jest strumień objętości powietrza wentylacyjnego, a po dokonaniu przekształceń – temperatura wewnętrzna. Strumień ten jest wynikiem jednoczesnego oddziaływania wszystkich wymuszeń na budynek o zdefiniowanej geometrii oraz oporze cieplnym przegród itd. Przepływ powietrza, przez analizowane w pracy budynki, tak jednostrefowe jak i dwustrefowe, odbywa się dzięki otworom wentylacyjnym, umiejscowionym w przeciwległych przegrodach obiektów (rys. 5.2–5.4 i 5.5–5.7).

Przedstawione w punktach 5.2 oraz 5.3 modele pozwalają oszacować niezależnie wpływ: waporu termicznego, strat ciepła przez przegrody oraz wiatru – na powstawanie strumienia objętości powietrza wentylacyjnego. Wzrost waporu termicznego wynika z obecności wewnętrznych źródeł ciepła, wspomaganych okresowo słonecznymi zyskami energetycznymi. Te trzy czynniki scharakteryzowane są odpowiednio określonymi w tekście rozdziału 5 parametrami  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ .

Zakłada się, że w opisie matematycznym procesów modeli powietrza w pomieszczeniu traktowane być może jako

- układ o parametrach skupionych, a więc przyjmuje się, że wszystkie parametry fizyczne są uśrednione i odniesione do środka masy układu;

lub

- układ, w którym znajdują się źródła ciepła, rozproszone równomiernie na podłodze. Źródła te w postaci ludzi lub zwierząt oraz sprzętu oddającego ciepło do pomieszczenia, generują strugi konwekcyjne, które powodują wymieszanie powietrza w obiekcie i ustalanie się stałej temperatury. Ten sam charakter źródeł ciepła reprezentuje promieniowanie słoneczne, pozyskiwane przez pomieszczenie za pośrednictwem okien oraz ogrzewanie podłogowe [59, 60, 78],

ponadto

- pomijana jest akumulacja ciepła w przegrodach budynku,
- zyski energetyczne pochodzące z promieniowania słonecznego pozyskiwane są jedynie za pośrednictwem okna i sumują się z tymi, uzyskiwanymi z wewnętrznych źródeł ciepła,
- wysokość otworów wentylacyjnych jest niewielka, w porównaniu z ich długością,
- zakłada się, że różnica gęstości, występująca pomiędzy powietrzem napływającym do budynku a wypływającym, może być w równaniu ciągłości pominięta w przypadku zachowania w mocy aproksymacji Boussinesq'a, (dodatek 2.1).

Modele Li, Delsante zostały nie tylko aproksymowane funkcjami trygonometrycznymi parametrów klimatu, jak już podano powyżej, ale także zmodyfikowane poprzez poszerzenie zakresu stosowania parametru  $\beta$  ( $\beta > 1$ ) [27].

Model jednostrefowy odnosić się może do budynków: przemysłowych, inwentarskich, hal sportowych, audytoriów, domów jednorodzinnych, a nawet niewielkich budynków mieszkalnych. Matematyczny model obiektu dwustrefowego

zawiera opis procesów, zachodzących na obu kondygnacjach-strefach budynku. Strefy połączone są między sobą otworem usytuowanym w stropie strefy dolnej.

Ilustracją zmodyfikowanych modeli są obliczenia wymiany powietrza i temperatury wewnętrznej w budynku inwentarskim, tak jednostrefowym, jak i dwustrefowym, gdzie hodowane tam zwierzęta traktowane są jako wewnętrzne źródła ciepła rozproszone po podłodze obiektu.

Wyniki obliczeń uzyskane z użycia modeli Li, Delsante oraz ich analiza, jak i uprzednio nabyte doświadczenie, dały asumpt do modelowania nieustalonych procesów ciepło-przepływowych w obiektach budowlanych, o różnej strukturze materiałowej przegród, a więc różnym ich oporze cieplnym. Wyniki tej pracy zawiera rozdział 6 i rozdział 7.

## 5.2. Założenia modelowe dla obiektu jednostrefowego

Według przyjętego modelu Li, Delsante, procesy ciepło-przepływowe w obiektach budowlanych opisują uproszczone równanie bilansu ciepła dla powietrza wewnętrznego o temperaturze  $T_i$  w pomieszczeniu o objętości  $V$ .

Pomieszczenie pozyskuje ciepło o mocy:

- $E_s$  – pochodzące z promieniowania słonecznego,
- $E_i$  – z wewnętrznych źródeł ciepła.

Straty ciepła powoduje:

- wentylacja naturalna w postaci nawiewu powietrza zewnętrznego o strumieniu masowym  $\dot{V}\rho_o$ ,
- przenikanie ciepła przez przegrody.

Równanie transportu ciepła w swojej wyjściowej postaci jest następujące:

$$V\rho_i c_p \frac{dT_i}{d\tau} + c_p \rho_o \dot{V}(T_i - T_o) + \sum h_i A_j (T_i - T_{j|_{wew}}) = E_i + E_s \quad (5.1)$$

$T_{j|_{wew}}$  w równaniu (5.1) oznacza temperaturę wewnętrznych powierzchni przegród obudowy budynku. Temperaturę  $T_j$  określa się na podstawie rozwiązania jednowymiarowego zagadnienia przewodnictwa ciepła. Zakłada się, że temperatura powietrza wewnętrznego  $T_i$  jest stała.

$$T_{j|_{wew}} = T_i + \frac{U_j}{h_i} \left( \frac{q_s \alpha_s}{h_o} - T_i + T_o \right) \quad (5.2)$$

gdzie:

- $A_j$  [ $m^2$ ] – powierzchnia przegród zewnętrznych,
- $U_j$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ] – współczynnik przenikania ciepła,
- $h_o, h_i$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ] – współczynniki przejmowania ciepła odpowiednio na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej.

Indeks „j” oznacza numer kolejnej przegrody.

Przy tym założeniu równanie (5.1) można przekształcić w równanie o poniższej postaci, w odniesieniu do nawiewu powietrza zewnętrznego, przy zdefiniowanej tzw. temperaturze słonecznej:

$$\rho_0 c_p \dot{V}(T_i - T_o) + \sum_j U_j A_j (T_i - T_{\text{Sol-air}}) = E_i + E_s \quad (5.3)$$

którą opisuje następująca zależność:  $T_{\text{Sol-air}} = T_o + \frac{\alpha_s q_s}{h_o}$ , gdzie  $q_s$  oznacza powierzchniową gęstość promieniowania słonecznego, a  $\alpha_s$  absorpcyjność ściany dla widma promieniowania słonecznego. Różnica występująca pomiędzy temperaturą  $T_{\text{Sol-air}}$ , a temperaturą otoczenia  $T_o$  pozwala sformułować równanie bilansowe dla temperatury wewnętrznej  $T_i$  i temperatury otoczenia  $T_o$  (5.4).

$$\dot{V} \rho_0 c_p (T_i - T_o) + \sum_j U_j A_j (T_i - T_o) = E \quad (5.4)$$

gdzie:

$$E = E_i + E_s + \sum_j U_j A_j (T_{\text{sol-air}} - T_o) \quad (5.5)$$

$E$  jest sumą: wewnętrznych źródeł ciepła ( $E_i$ ), zysków energetycznych z promieniowania słonecznego – bezpośrednich ( $E_s$ ) oraz pośrednich, pozyskiwanych w wyniku przewodzenia przez ściany. Zyski energetyczne  $E_s$  pozyskiwane są jedynie przez okna o powierzchni  $A_{\text{ok}}$  i wyrażone są następująco  $E_s = \tau_{\text{ok}} A_{\text{ok}} q_s$ . Wartość współczynnika  $\tau_{\text{ok}}$  określa intensywność przepuszczania promieniowania słonecznego do wnętrza obiektu za pośrednictwem przegród przezroczystych..

Spadek ciśnienia, wynikający z różnicy gęstości powietrza, który powstaje pomiędzy podłogą i sufitem na wysokości  $h$  wynosi  $(g'h)^{1/2}$  gdzie  $g' = g \Delta T/T_o = g \Delta \rho/\rho_o$ . Wywołuje on przepływ powietrza, którego strumień objętości można policzyć posługując się równaniem (5.6), [19, 55, 74, 78].

$$\dot{V} = C_d A_{\text{ef}} \left[ 2gh \left( \frac{T_i}{T_o} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

$$A_{\text{ef}} = a_1 a_2 / \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \quad (5.7)$$

Zależność (5.7), opisująca efektywną powierzchnię otworów wentylacyjnych. Informacje na temat tej wielkości można znaleźć m.in. w [73, 74, 77, 78].  $a_1$  i  $a_2$  są geometrycznymi powierzchniami otworów wentylacyjnych. W przedstawianych tu obliczeniach przyjęto jednakowy współczynnik  $C_d = C_{d1} = C_{d2}$  dla obu otworów, równy 0,6 [16, 49, 92]. Oddziaływanie tego współczynnika na strumieni objętości powietrza przedstawiono w rozdziale 2.

Układ równań (5.4) i (5.6) umożliwia wyeliminowanie z nich nieznannej temperatury wewnętrznej  $T_i$  i prowadzi po przeprowadzeniu pewnych przekształceń, które można znaleźć w [27] do uzyskania równania opisującego strumień objętościowy powietrza wentylacyjnego:

$$\dot{V}^3 + 3\beta\dot{V}^2 - 2\alpha^3 = 0 \quad (5.8)$$

gdzie:

$$\alpha = (C_d A_{ef})^{2/3} (Bh)^{1/3} \quad (5.9)$$

Poprzez współczynnik  $\alpha$  determinowany jest wpływ wyporu termicznego na ilość wymienianego powietrza. Parametr  $h$  jest pionową odległością pomiędzy otworami wentylacyjnymi, a  $B = \frac{Eg}{\rho_0 c_p T_0}$  definiuje wypór termiczny.

Współczynnik  $\beta$  z kolei, określa wpływ strat ciepła przez przegrody zewnętrzne na intensywność przepływającego przez budynek powietrza.  $\sum U_j A_j$  oznacza sumę iloczynów powierzchni wszystkich przegród obiektu i ich współczynników przenikania ciepła.

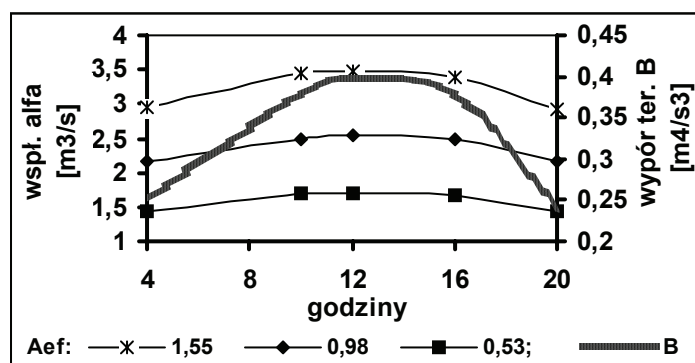
$$\beta = \sum U_j A_j / 3\rho c_p \quad (5.10)$$

Równanie (5.8) nie uwzględnia wpływu wiatru, który jest scharakteryzowany parametrem  $\gamma$ . Przepływ powietrza, w tym wypadku, wynika jedynie z powstającego deficytu gęstości powietrza.

Wypływający strumień powietrza charakteryzuje się objętością i pędem, a może także posiadać wypór, który powstaje z różnicy gęstości powietrza. Wyporność na wylocie z otworu odpływowego wynika ze strumienia zużytego powietrza o gęstości  $\rho_i$  wpływającego do powietrza otoczenia o gęstości  $(\rho_i + \Delta\rho)$ . Siły wyporu termicznego są więc siłami, które kontrolują ilości wymienianego z otoczeniem powietrza. Są one funkcją wewnętrznych źródeł ciepła  $E_i$ , zmiennej temperatury zewnętrznej  $T_o$  i uśrednionych dla miesiąca zysków energetycznych  $E_s$ , pochodzących z promieniowania słonecznego. Ilość wymienianego powietrza kontrolowana jest także powierzchnią efektywną  $A_{ef}$  otworów wentylacyjnych. Rysunek 5.1 pokazuje wpływ wymienionych powyżej czynników na kształtowanie się strumienia objętości powietrza wentylacyjnego.

Fizyczne znaczenie mają jedynie dodatnie i rzeczywiste pierwiastki równania (5.8). Przy dodatnim wyznaczniku pierwiastkiem równania, który określa strumień objętości przepływającego przez budynek powietrza  $\dot{V}$ , jest:

$$\dot{V}_{D>0} = -\beta + \beta^2/\omega + \omega \quad \text{gdzie} \quad \omega = \left( \alpha^3 - \beta^3 + (\alpha^6 - 2\alpha^3\beta^3)^{1/2} \right)^{1/3} \quad (5.11)$$



Rys. 5.1. Dobowy przebieg strumienia objętości powietrza wyrażony współczynnikiem termicznym  $\alpha$ , przy trzech różnych powierzchniach efektywnych otworów wentylacyjnych. Warunki pogodowe przyjęto jak dla kwietnia.

Natomiast dla ujemnego wyznacznika pierwiastkiem równania (5.8), jest:

$$\dot{V}_{D<0} = \left(2\cos\left(\frac{\pi - \arccos\left(1 - (\alpha/\beta)^3\right)}{3}\right) - 1\right)\beta \quad (5.12)$$

Dla zadanych wartości  $\alpha$  i  $\beta$  ( $\beta < 1$  i  $\beta > 1$ ) otrzymuje się pełny zakres występowania przepływu powietrza  $\dot{V}$ .

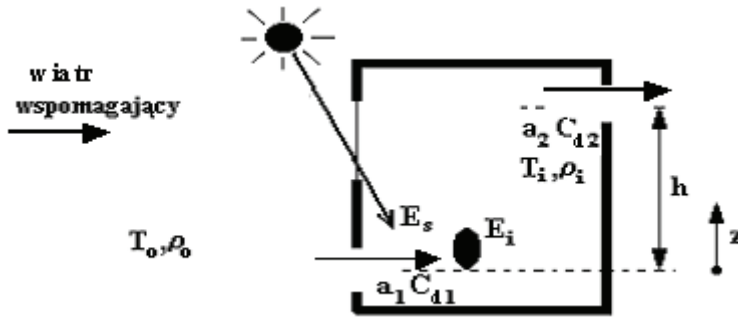
Zależność (5.10) implikuje, że im niższa jest wartość współczynnika  $\beta$  tym lepsza jest izolacyjność przegród, a więc mniej intensywne wymiany ciepła z otoczeniem zewnętrznym budynku i wyższa temperatura wewnętrzna. W związku z tym należy się spodziewać, że strumień wymienianego z otoczeniem powietrza, powstający w wyniku działania jedynie wyporu termicznego, będzie większy niż w domach gorzej zaizolowanych cieplnie.

### 5.2.1. Wpływ wiatru na strumień objętości wymienianego powietrza w budynku jednostrefowym

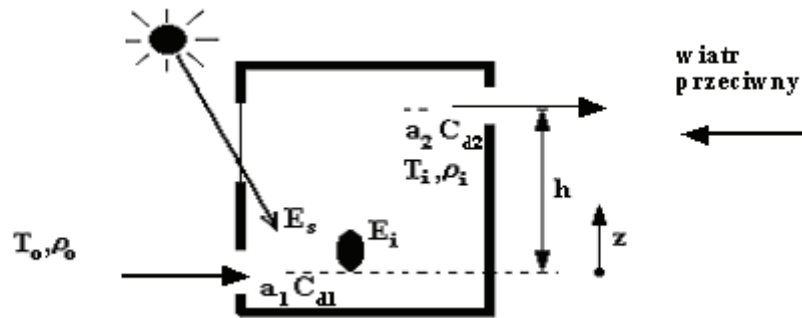
Badanie wpływu wiatru na strumień powietrza wentylacyjnego wymaga rozważenia trzech przypadków, które przedstawiają schematy na rys. 5.2–5.4:

- wiatr wspomagający, który intensyfikuje strumień powietrza wentylacyjnego, oddziałujący od strony dolnego otworu; powietrze przepływa od otworu dolnego do górnego – rys. 5.2,
- wiatr przeciwny:
  - napływa od strony otworu górnego i powoduje tłumienie przepływu. Siły wynikające z działania wiatru, nie są w stanie pokonać siły wynikającej z deficytu gęstości powietrza; powietrze przepływa od otworu dolnego do górnego – rys. 5.3,

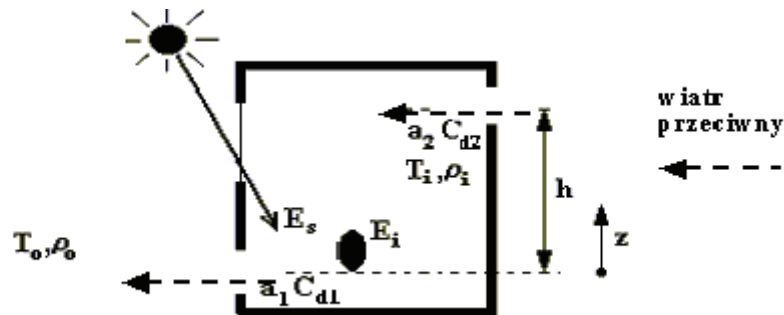
- odwraca kierunek przepływu powietrza przez budynek, działa od strony otworu górnego. Siły, wynikające z działania wiatru, przewyższają te wytwarzane przez wypór termiczny i powodują przepływ odwrotny; powietrze przepływa od otworu górnego do dolnego – rys. 5.4.



Rys. 5.2. Przepływ powietrza przez budynek zachodzi w wyniku działania całkowitych sił wyporu termicznego i wiatru wspomagającego.



Rys. 5.3. Przepływ powietrza przez budynek zachodzi w wyniku działania całkowitych sił wyporu termicznego oraz wiatru przeciwnego – przepływ tłumiony.



Rys. 5.4. Przepływ powietrza przez budynek zachodzi w wyniku działania całkowitych sił wyporu termicznego oraz wiatru przeciwnego – przepływ odwrotny.

W przypadku obecności wiatru wspomagającego przepływ powietrza przez budynek, równanie (5.6) zostaje rozbudowane o człon opisujący spadek ciśnienia, wywołowany wiatrem i przybiera postać:

$$\dot{V} = C_d A_{ef} \left( \left[ 2gh \left( \frac{T_i}{T_o} - 1 \right) + \frac{2\Delta p_v}{\rho_o} \right] \right)^{1/2} \quad (5.13)$$

gdzie:

$$\frac{\Delta p_v}{\rho_o} = 0,5(C_{p1} v_1^2 - C_{p2} v_2^2) \quad (5.14)$$

$v_1$  i  $v_2$  są prędkościami wiatru, a  $C_{p1}$  i  $C_{p2}$  są bezwymiarowymi współczynnikami ciśnienia po stronie nawietrznej i zawietrznej. W obliczeniach przyjęto  $C_{p1} = 0,7$ , a  $C_{p2} = -0,2$  [78]. Przy wietrze przeciwnym, w równaniu (5.13), człon ciśnieniowy ( $\Delta p_v$ ) poprzedzony jest znakiem ujemnym.

### 5.2.1a. Wiatr wspomagający przepływ powietrza wentylacyjnego

Przy założeniach podanych w 5.2 oraz przy wykorzystaniu zależności (5.9), (5.10), (5.13) i dokonaniu przekształceń, otrzymuje się wyrażenie opisujące strumień objętościowy powietrza wentylacyjnego. Wiatr wzmacnia w tym wypadku przepływ powietrza przez budynek:

$$\dot{V}^3 + 3\beta\dot{V}^2 - 3\gamma^2\dot{V} - 2\alpha^3 - 9\gamma^2\beta = 0 \quad (5.15)$$

parametr  $\gamma$ , który definiuje wpływ wiatru na ilość powietrza wentylacyjnego przy  $v_1$  i  $v_2 = v$  dany jest zależnością [72]:

$$\gamma = \frac{(C_d A_{ef})}{\sqrt{3}} \sqrt{\rho_o (v_1^2 C_{p1} - v_2^2 C_{p2}) / 2} \quad (5.16)$$

Rozwiązanie równania (5.15) zależy od wartości wyznacznika D:

$$D = \alpha^6 - 2\alpha^3(\beta^3 - 3\beta\gamma^2) - (-3\beta^2\gamma + \gamma^3)^2 \quad (5.17)$$

$$\omega = (\alpha^3 - \beta^3 + 3\beta\gamma^2 + \sqrt{D})^{1/3} \quad (5.18)$$

Dla wyznacznika D o wartości dodatniej strumień przepływający przez budynek powietrza wynosi:

$$\dot{V}_{D>0} = -\beta + (\beta^2 + \gamma^2) / \omega + \omega \quad (5.19)$$

Natomiast przy wartości ujemnej wyznacznika D, wprowadzając parametr  $Q_r$ :

$$Q_r = \beta^3 - \alpha^3 - 3\gamma^2\beta \quad (5.20)$$

oraz parametr  $r$ :

$$r = -(\beta^2 + \gamma^2)^{1/2} \quad (5.21)$$

Otrzymuje się trzy pierwiastki, z których tylko jeden ma wartość dodatnią, a pozostałe dwa ujemną. Postać pierwiastków dana jest poniższymi zależnościami:

$$\dot{V}_{D<0} = -2r \cos(\varphi/3) - \beta \quad (5.22)$$

$$\dot{V}_{D<0} = -2r \cos(60 - \varphi/3) - \beta \quad (5.23)$$

$$\dot{V}_{D<0} = -2r \cos(60 + \varphi/3) - \beta \quad (5.24)$$

gdzie  $\cos\varphi = Q_r / r^3$ , a temperatura wewnętrzna dana jest poniższą zależnością:

$$T_i = (\dot{V}^2 - 3\gamma^2)E / 2\alpha^3 \rho_o c_p + T_o \quad (5.25)$$

#### 5.2.1b. Wiatr przeciwny – tłumiący lub odwracający kierunek przepływu powietrza wentylacyjnego

W przypadku wiatru napływającego od strony górnego otworu wentylacyjnego, przepływ powietrza może odbywać się zarówno ku górze, tj. od dolnego otworu wentylacyjnego do górnego, a także do dołu, tj. od górnego otworu wentylacyjnego do dolnego. W pierwszym przypadku spadek ciśnienia, wytwarzany przez wiatr, jest mniejszy od spadku ciśnienia generowanego różnicą temperatur ( $T_i > T_o$ ) i dlatego przepływ powietrza odbywa się w dalszym ciągu ku górze. W przypadku, kiedy spadek ciśnienia wytwarzany przez wiatr jest większy od tego, wytwarzanego przez różnicę temperatur, następuje odwrócenie kierunku przepływu powietrza. Wychodząc w dalszym ciągu z równania bilansowego (5.4) i równania (5.13) oraz (5.14) otrzymuje się – dla powyżej opisanych przypadków – następujące równanie:

$$\dot{V}^3 + 3\beta^2 = |2\alpha^3 - 3\gamma^2\dot{V} - 9\gamma^2\beta| \quad (5.26)$$

Przy przepływie powietrza skierowanym do góry, całkowity wypór termiczny góruje nad oddziaływaniem wiatru, co można ująć w formie poniższej nierówności:

$$2\alpha^3 > 3\gamma^2\dot{V} + 9\gamma^2\beta \quad (5.27)$$

w konsekwencji, równanie (5.26) z przepływem powietrza skierowanym ku górze, przybiera poniższą postać:

$$\dot{V}^3 + 3\beta\dot{V}^2 - 2\alpha^3 + 3\gamma^2\dot{V} + 9\gamma^2\beta = 0 \quad (5.28)$$



Wyznacznik D równania (5.28) jest następujący:

$$D = \alpha^6 - 2\alpha^3(\beta^3 + 3\beta\gamma^2) + (3\beta^2\gamma + \gamma^3)^2 \quad (5.29)$$

$$\omega = (\alpha^3 - \beta^3 - 3\beta\gamma^2 + \sqrt{D})^{1/3} \quad (5.30)$$

Pierwiastek rzeczywisty równania (5.28), przy dodatnim wyznaczniku  $D > 0$ , jest następujący:

$$\dot{V}_{D>0} = -\beta + (\beta^2 - \gamma^2)/\omega + \omega \quad (5.31)$$

Przy ujemnym wyznaczniku  $D < 0$  oraz parametrach  $Q_r > 0$ , gdzie:

$$Q_r = \beta^3 - \alpha^3 + 3\gamma^2\beta, \text{ oraz } r = (\beta^2 - \gamma^2)^{1/2} \text{ i } \cos\varphi = Q_r / r^3 \quad (5.32)$$

Pierwiastek rzeczywisty równania (5.28), przy  $D < 0$ , wyliczany jest według zależności (5.22).

Temperaturę wewnętrzną  $T_i$ , przy wietrze przeciwnym z przepływem skierowanym ku górze, wyznacza się z poniższej zależności:

$$T_i = (\dot{V}^2 + 3\gamma^2)E / 2\alpha^3\rho_o c_p + T_o \quad (5.33)$$

W przypadku, kiedy spadek ciśnienia, wywołany działaniem wiatru, pokonuje spadek ciśnienia wynikający z różnicy temperatur, zachodzi nierówność:

$$2\alpha^3 < 3\gamma^2\dot{V} + 9\gamma^2\beta \quad (5.34)$$

Przy wietrze przeciwnym, który powoduje odwrotny przepływ powietrza, równanie (5.26) przybiera następującą postać:

$$\dot{V}^3 + 3\beta\dot{V}^2 - 3\gamma^2\dot{V} + 2\alpha^3 - 9\gamma^2\beta = 0 \quad (5.35)$$

Wartość wyznacznika równania (5.35) wynosi:

$$D = \alpha^6 + 2\alpha^3(\beta^3 - 3\beta\gamma^2) - (3\beta^2\gamma + \gamma^3)^2 \quad (5.36)$$

przy czym dokonane jest podstawienie  $\omega$ , tak jak i w powyższych rozwiązaniach, gdzie:

$$\omega = (-\alpha^3 - \beta^3 + 3\beta\gamma^2 + \sqrt{D})^{1/3} \quad (5.37)$$

Przy dodatniej wartości wyznacznika  $D > 0$  rzeczywisty pierwiastek równania (5.36) przybiera postać:

$$\dot{V}_{D>0} = -\beta + (\beta^2 + \gamma^2) / \omega + \omega \quad (5.38)$$

Przy wyznaczniku  $D < 0$  i  $Q_r > 0$ , gdzie  $Q_r$  jest zdefiniowane następująco:

$$Q_r = \beta^3 - \alpha^3 + 3\gamma^2\beta \quad (5.39)$$

a parametr  $r$ :

$$r = (\beta^2 - \gamma^2)^{1/2} \quad (5.40)$$

z kolei dla  $Q < 0$ :

$$r = -(\beta^2 - \gamma^2)^{1/2}; \quad \cos \varphi = Q_r / r^3 \quad (5.41)$$

Pierwiastek rzeczywisty równania (5.35), przy  $D < 0$ , wyliczany jest według zależności (5.22), a temperatura wewnętrzna  $T_i$  wyznaczana jest z zależności:

$$T_i = (3\gamma^2 - \dot{V}^2)E / 2\alpha^3 \rho_o c_p + T_o \quad (5.42)$$

Temperatury wewnętrzne: (5.25), (5.33), (5.42) otrzymuje się przy założeniu, że współczynnik  $\beta$  równy jest zero.

### 5.3. Założenia modelowe dla obiektu dwustrefowego

Matematyczny model naturalnej wymiany powietrza w dwustrefowym budynku, w swoim założeniu opiera się, tak jak w przypadku budynku jednostrefowego, na uproszczonym równaniu bilansu ciepła dla powietrza wewnętrznego, w pomieszczeniu o objętości  $V$  i o temperaturze  $T_i$ . Model, który służy szacowaniu strumienia objętościowego  $V$  powietrza wentylacyjnego w obiektach dwustrefowych, poddano takiej samej modyfikacji jak ten, który opisywał procesy ciepło-przepływowe w budynkach jednostrefowych. Model ten także wyróżnia wpływ współczynnika waporu termicznego  $\alpha$ , strat ciepła przez przegrody  $\beta$  i wiatru  $\gamma$ , na ilość powietrza, wymianianego pomiędzy budynkiem a otoczeniem zewnętrznym.

Dla obiektu dwustrefowego formułuje się układy równań dla temperatur wewnętrznych  $T_1$  i  $T_2$  w obu strefach oraz temperatury otoczenia  $T_o$  dla dwu poniższych przypadków, kiedy kierunek przepływu powietrza przez budynek odbywa się ku górze (5.43):

- strumień powietrza intensyfikowany jest wiatrem wspomagającym – rys. 5.5,
- spadek ciśnienia, wynikający z działania wiatru przeciwnego, jest mniejszy niż ten generowany różnicą gęstości temperatur – rys. 5.6; [26, 73],

$$\rho_0 c_p |\dot{V}| (T_1 - T_0) + \sum U_{1j} A_{1j} (T_1 - T_0) = E_1; \quad (5.43)$$

$$\rho_0 c_p |\dot{V}| (T_2 - T_1) + \sum U_{2j} A_{2j} (T_2 - T_0) = E_2 + E_S$$

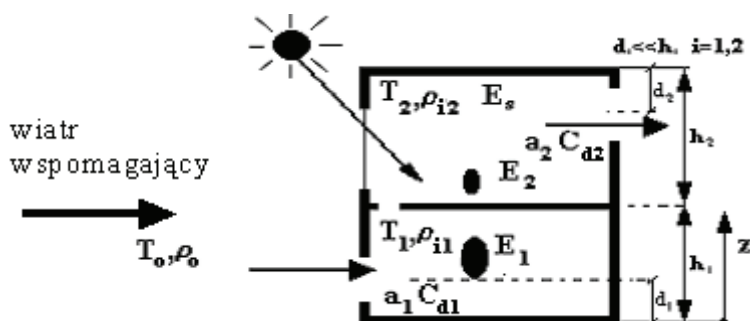
oraz w trzecim przypadku:

- przepływ odwrotny opisany układem równań (5.44). Strumień powietrza skierowany jest w tym wypadku do dołu – rys. 5.7

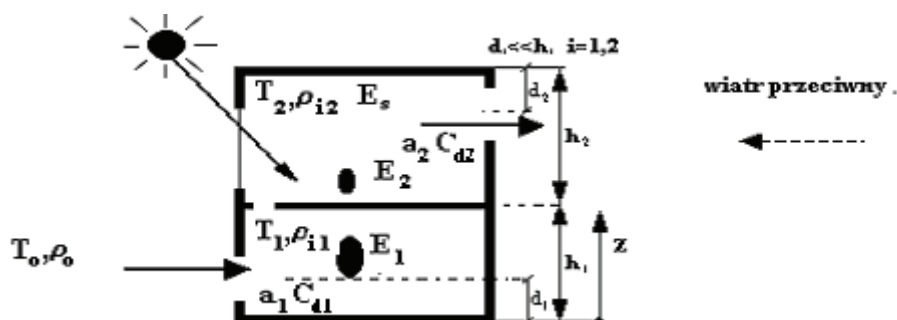
$$\rho_0 c_p |\dot{V}| (T_1 - T_2) + \sum U_{1j} A_{1j} (T_1 - T_0) = E_1; \quad (5.44)$$

$$\rho_0 c_p |\dot{V}| (T_2 - T_0) + \sum U_{2j} A_{2j} (T_2 - T_0) = E_2 + E_S$$

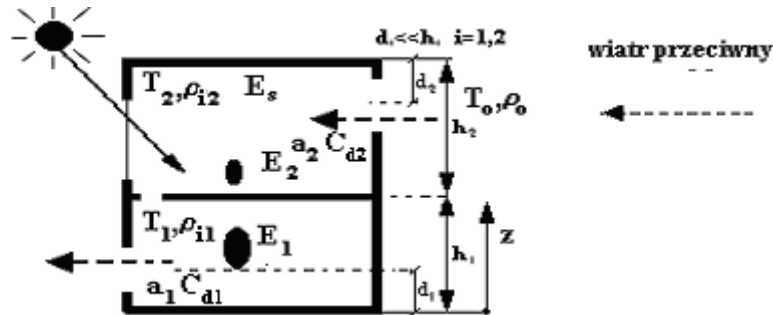
Indeks „1” odnosi się do strefy pierwszej, indeks „2” do strefy drugiej.



Rys. 5.5. Przepływ powietrza przez budynek przy wietrze wspomagającym



Rys. 5.6. Przepływ powietrza przez budynek skierowany ku górze przy wietrze przeciwnym



Rys. 5.7. Odwrotny przepływ powietrza przez budynek przy wietrze przeciwnym

Podany, w formie równań bilansowych, matematyczny model naturalnej wymiany powietrza w dwustrefowych obiektach budowlanych, podobnie jak model jednostrefowy, został stworzony przy uproszczeniach podanych w podrozdziale 5.1. Dodatkowo zakłada się, że przegroda pomiędzy strefami budynku, tj. dolnym i górnym piętrzem, jest adiabatyczna.

Analogią do równania (5.13), w przypadku obiektu dwustrefowego, jest równanie:

$$\dot{V} = C_d A_{ef} \sqrt{2h_1 g \left( \frac{T_1 - T_o}{T_o} \right) + 2h_2 g \left( \frac{T_2 - T_o}{T_o} \right) \pm \frac{2\Delta p_v}{\rho_o}} \quad (5.45)$$

gdzie:  $A_{ef}$  nosi nazwę, jak w przypadku modelu jednostrefowego, efektywnej powierzchni otworów wentylacyjnych, ale fizycznie oznacza łączną powierzchnię swobodnego przepływu strugi na wlocie i wypływie z pomieszczenia oraz dodatkowo pomiędzy strefami obiektu [73],  $h_{1,2}$  jest odległością w pionie, pomiędzy otworami wentylacyjnymi a adiabatyczną przegrodą we wnętrzu obiektu. W obliczeniach przyjmuje się, że  $d_1 \ll h_1$  i  $d_2 \ll h_2$ , więc w równaniach (5.45) i (5.46) przyjęto, że:  $h_1 - d_1 \sim h_1$  oraz  $h_2 - d_2 \sim h_2$ .

1. Współczynniki  $\alpha$ , w obiekcie dwustrefowym definiuje się dla przepływu skierowanego ku górze i ku dołowi oraz niezależnie – dla każdej ze stref budynku [73]:

$$\begin{aligned} \alpha_g &= (C_d A_{ef})^{2/3} [(B_1(h_1 + h_2) + B_2 h_2)]^{1/3}, \\ \alpha_d &= (C_d A_{ef})^{2/3} [(B_2(h_1 + h_2) + B_1 h_1)]^{1/3}, \\ \alpha_{1,2} &= (C_d A_{ef})^{2/3} (B_{1,2} h_{1,2})^{1/3} \end{aligned} \quad (5.46)$$

gdzie: „g” – przepływ do góry, „d” – przepływ ku dołowi, „1” – strefa pierwsza, „2” – strefa druga.

2. Intensywność przepływu powietrza przez budynek, zależna od izolacyjności przegród w obu strefach; współczynnik  $\beta$  wyznaczany jest niezależnie dla każdej ze stref,

$$\beta_{1,2} = \sum U_{1j,2j} A_{1j,2j} / 3\rho_o c_p \quad (5.47)$$

3. Wartość współczynnika  $\gamma$  różnicuje prędkości napływu wiatru; inna dla wiatrów wspomagającego i przeciwnego

$$\gamma = \frac{C_d A_{ef}}{\sqrt{3}} \sqrt{\rho_o (v_1^2 C_{p1} - v_2^2 C_{p2}) / 2} \quad (5.48)$$

Tak jak w przypadku modelu jednostrefowego  $v_{1,2}$  oznacza prędkość wiatru od strony nawietrznej i zawietrznej. Wartość współczynników ciśnieniowych  $C_{p1}$  i  $C_{p2}$  przyjęta jak w rozwiązaniu modelu jednostrefowego.

Przekształcenie układu równań (5.43) lub (5.44), wraz z równaniem (5.45) oraz wykorzystanie trzech parametrów –  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  (5.46), (5.47), (5.48) – umożliwia otrzymanie równań opisujących zmiany strumienia powietrza wentylacyjnego  $\dot{V}$  dla trzech przypadków:

- 1) przepływ powietrza przy wietrze wspomagającym:

$$\begin{aligned} \dot{V}^4 + 3(\beta_1 + \beta_2)\dot{V}^3 + (9\beta_1\beta_2 - 3\gamma^2)\dot{V}^2 + \\ - (2\alpha_g^3 + 9(\beta_1 + \beta_2)\gamma^2)\dot{V} - 6\beta_1\alpha_2^3 - 6\alpha_1^3\beta_2 - 27\beta_1\beta_2\gamma^2 = 0 \end{aligned} \quad (5.49)$$

- 2) przepływ powietrza skierowany ku górze przy wietrze przeciwnym:

$$\begin{aligned} \dot{V}^4 - 3(\beta_1 + \beta_2)\dot{V}^3 + (9\beta_1\beta_2 - 3\gamma^2)\dot{V}^2 + \\ - (2\alpha_d^3 - 9(\beta_1 + \beta_2)\gamma^2)\dot{V} + 6\beta_1\alpha_2^3 + 6\alpha_1^3\beta_2 - 27\beta_1\beta_2\gamma^2 = 0 \end{aligned} \quad (5.50)$$

- 3) odwrotny przepływ powietrza przy wietrze przeciwnym:

$$\begin{aligned} \dot{V}^4 + 3(\beta_1 + \beta_2)\dot{V}^3 + (9\beta_1\beta_2 + 3\gamma^2)\dot{V}^2 + \\ - (2\alpha_g^3 - 9(\beta_1 + \beta_2)\gamma^2)\dot{V} - 6\beta_1\alpha_2^3 - 6\alpha_1^3\beta_2 + 27\beta_1\beta_2\gamma^2 = 0 \end{aligned} \quad (5.51)$$

Jak można wykazać, na mocy układów równań bilansowych (5.43) i (5.44) oraz wyrażenia (5.45), po dokonaniu przekształceń otrzymuje się zależności na temperaturę w strefach  $T_1$  i  $T_2$ :

- przepływy powietrza, skierowane ku górze, tak przy wietrze wspomagającym jak i przeciwnym, który jedynie tłumy przepływ:

$$T_1 = \left( \frac{B_1}{g(|\dot{V}| + 3\beta_1)} + 1 \right) T_0 \quad (5.52)$$

$$T_2 = ( B_2 / g + |\dot{V}| T_1 / T_0 + 3\beta_2 ) / (|\dot{V}| + 3\beta_2) T_0 \quad (5.53)$$

a w przypadku przepływów odwrotnych:

$$T_1 = ( B_1 / g + |\dot{V}| T_2 / T_0 + 3\beta_1 ) / (|\dot{V}| + 3\beta_1) T_0 \quad (5.54)$$

$$T_2 = ( B_2 / g + (|\dot{V}| + 3\beta_2) T_1 / T_0 ) / (|\dot{V}| + 3\beta_2) T_0 \quad (5.55)$$

#### 5.4. Charakterystyka testowanych obiektów

Model jednostrefowy został wykorzystany do badania przepływu powietrza wentylacyjnego w trzech budynkach gospodarczych o jednakowych gabarytach  $30 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$ . Ściany, w tym dach baraków, wykonane są kolejno z:

- paneli aluminiowych;  
współczynnik przenikania ciepła –  $U_{\text{alum}} = 5,88 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ,  $\beta = 1,129$ ,
- paneli aluminiowych izolowanych warstwą styropianu o grubości 5 cm;  
 $U_{5\text{cm}} = 0,75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ,  $\beta = 0,487$ ,
- paneli aluminiowych izolowanych warstwą styropianu o grubości 20 cm;  
 $U_{20\text{cm}} = 0,207 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ,  $\beta = 0,0591$ .

Odległość pomiędzy otworami wentylacyjnymi, usytuowanymi jak na rys. 5.2–5.4, wynosi  $h = 3 \text{ m}$ . Powierzchnia efektywna otworów przepływowych wynosi  $1 \text{ m}^2$ . W ścianie skierowanej na południe, tej samej, w której istnieje górny otwór wentylacyjny, znajduje się okno o powierzchni  $28 \text{ m}^2$ . Zyski energetyczne uzyskiwane z promieniowania słonecznego, sumują się z wewnętrznym źródłem ciepła, pochodzącym od przebywających w baraku zwierząt. Zakłada się, że przy przyjętej powierzchni budynku inwentarskiego moc cieplna hodowanych w nim zwierząt może

osiągnąć  $E_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot 9 \cdot 10^3 \text{ W}$ .

W obliczeniach wykorzystano średnie miesięczne temperatury otoczenia oraz zyski energetyczne, pochodzące z promieniowania słonecznego [23, 24]. Temperatura wewnętrzna budynku jest nieznaną. Jej poziom kształtują zyski ciepła pochodzące od zwierząt i z promieniowania słonecznego, temperatura zewnętrzna, geometria otworów wentylacyjnych i pionowa odległość pomiędzy nimi, stopień izolacyjności przegród i – w dalszych obliczeniach – prędkość oraz kierunek wiatru [31].

Wykorzystany model dwustrefowy opisuje przepływ powietrza w dwóch budynkach gospodarczych o jednakowych gabarytach –  $30 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ . Wnętrze obiektów podzielone jest na dwie strefy adiabaticzną przegrodą. W przegrodzie tej

znajduje się otwór, przez który odbywa się wymiana powietrza przez strefy. Ściany, w tym dach kolejnych baraków, wykonane są z:

- paneli aluminiowych izolowanych warstwą styropianu o grubości 2 cm, co odpowiada współczynnikowi przenikania ciepła  $U_{2\text{cm}} = 0,881 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ;  $\beta_1 = 0,150$ ;  $\beta_2 = 0,250$ ,
- paneli aluminiowych izolowanych warstwą styropianu o grubości 20 cm;  $U_{20\text{cm}} = 0,207 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ;  $\beta_1 = 0,047$ ;  $\beta_2 = 0,064$

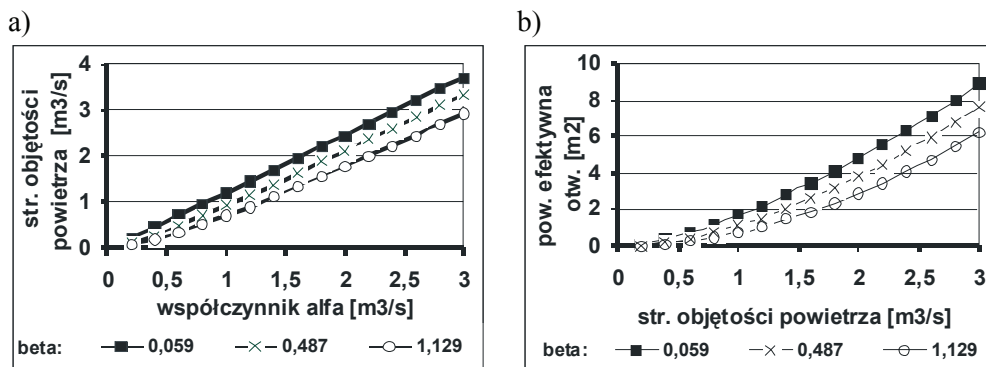
podłogę obu budynków izoluje 20 cm warstwa styropianu przykryta wylewką betonową, a transmisyjność szkła okiennego w obu budynkach wynosi 0,68 [100].

W strefie pierwszej budynku, w ścianie o orientacji północnej, otwór wentylacyjny znajduje się nad podłogą. Drugi otwór umiejscowiony jest w strefie górnej, w ścianie południowej. Odległość pomiędzy otworem wentylacyjnym na parterze, a przegrodą adiabatyczną, wynosi 3,5 m. Na piętrze odległość ta wynosi 2,5 m. Schematy badanych budynków przedstawiają rys. 5.5–5.7. Powierzchnia efektywna otworów przepływowych wynosi  $1 \text{ m}^2$ . W ścianie skierowanej na południe, w obrębie drugiej strefy, znajduje się okno o powierzchni  $28 \text{ m}^2$ . W pierwszej strefie występuje stałe źródło ciepła, którym są hodowane w baraku zwierzęta. Strefa druga czerpie energetyczne zyski także ze stałego, choć niewielkiego, źródła ciepła oraz z promieniowania słonecznego, które dociera przez okno. Zyski ciepła pochodzące od zwierząt, wynoszą w strefach, odpowiednio:

$$E_1 = \sum_{i=1}^n e_i = 9 \cdot 10^3 \text{ W}, \quad E_2 = \sum_{j=1}^n e_j = 1 \cdot 10^2 \text{ W}.$$

### 5.5. Wyniki obliczeń w obiekcie jednostrefowym

Rysunek 5.8a przedstawia wpływ wyporu termicznego, poprzez współczynnik  $\alpha$  (5.9), na objętość strumienia powietrza w budynkach, o różnej izolacyjności przegród zewnętrznych (5.8). Pominięto wpływ wiatru. Temperatura zewnętrzna



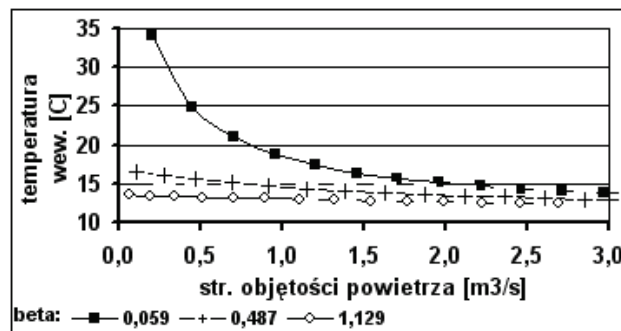
Rys. 5.8. Relacja pomiędzy: a) współczynnikiem termicznym  $\alpha$  a strumieniem objętości powietrza w budynkach o różnym współczynniku  $\beta$ , b) powierzchnią efektywną otworów wentylacyjnych, a współczynnikiem  $\alpha$ .

i promieniowanie słoneczne przyjęte jak dla kwietnia. Izolacyjność przegród charakteryzują trzy podane na wykresie współczynniki  $\beta$ . Natomiast rys. 5.8b dotyczy tych samych budynków i pokazuje relacje pomiędzy powierzchnią otworów wentylacyjnych, a ilością przepływającego powietrza.

Z zależności (5.9) wynika, że stopień izolacyjności ściany nie wpływa na wartość współczynnika  $\alpha$ . Współczynnik ten, w przypadku stałej mocy wewnętrznych źródeł ciepła i odległości między otworami, nie ulega zmianie. Ale w ciągu doby zmieniają się słoneczne zyski energetyczne oraz temperatura zewnętrzna, stąd zmiana wartości wyporu termicznego  $B$ , jak i strumienia powietrza przezeń generowanego. W przypadku niewielkich zmian wymienionych parametrów pogody, lub gdy ważą one niewiele w porównaniu z mocą wewnętrznego źródła ciepła, na intensywność wymiany powietrza wpływa głównie powierzchnia otworów wentylacyjnych.

Po dokonaniu przekształceń, z wykorzystaniem równania (5.6), otrzymano zależność opisującą temperaturę wewnątrz obiektu [27]. Obiekt nie jest poddany działaniu wiatru.

$$T_i = \dot{V}^2 E / (2c_p \rho_o \alpha^3) + T_o \quad (5.56)$$



Rys. 5.9. Wpływ izolacyjności przegród zewnętrznych na temperaturę wewnętrzną. Warunki pogodowe przyjęte jak dla kwietnia

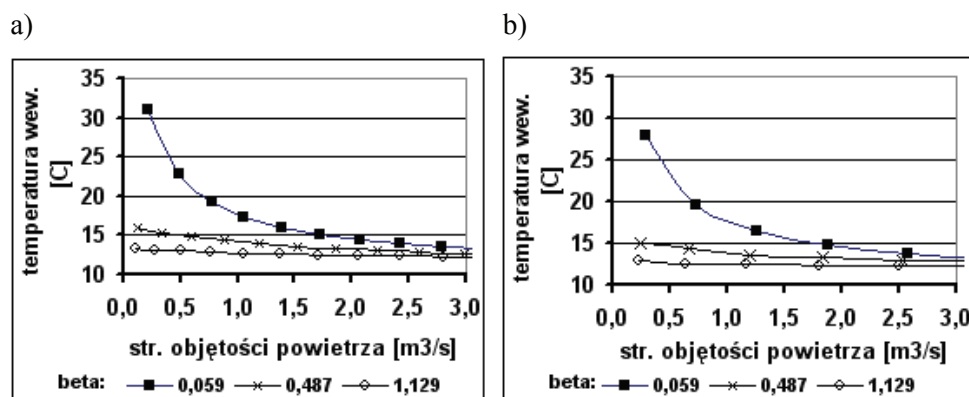
Górna krzywa na rys. 5.9 przedstawia temperaturę wewnętrzną w budynku o najwyższej izolacyjności ścian zewnętrznych. Wysoka wartość temperatury jest wynikiem słabej wymiany ciepła z otoczeniem zewnętrznym. Dlatego też budynki o wysokiej szczelności i izolacyjności przegród zewnętrznych, w przyjętych warunkach eksploatacyjnych, wymagają intensywnej wymiany powietrza, nie tylko z racji usunięcia wilgoci i zanieczyszczeń, ale w celu odprowadzenia nadmiaru ciepła z ich wnętrza. Z dalszych badań wynika, że dopiero przy zwiększeniu powierzchni efektywnej otworów wentylacyjnych, z  $1 \text{ m}^2$  do ok.  $4 \text{ m}^2$ , opór cieplny przegród przestaje wywierać wpływ na temperaturę wewnętrzną obiektu.

Warunki, w których przepływ powietrza przez budynek wynika jedynie z wyporu termicznego, nie muszą oznaczać okresów bezwietrznych. W praktyce sto-



suje się, zależnie od potrzeb, osłony na otwory wentylacyjne, które osłabiają bardzo lub wręcz neutralizują wpływ wiatru.

Natomiast rys. 5.10a i 5.10b przedstawiają temperaturę w trzech budynkach jedno-strefowych o różnej izolacyjności przegród zewnętrznych, w których intensywność wymiany powietrza wynika także z działania wiatru o funkcjach wspomagających przepływ powietrza wentylacyjnego (5.25).



Rys. 5.10. Wpływ wiatru wspomagającego na spadek temperatury wewnętrznej.

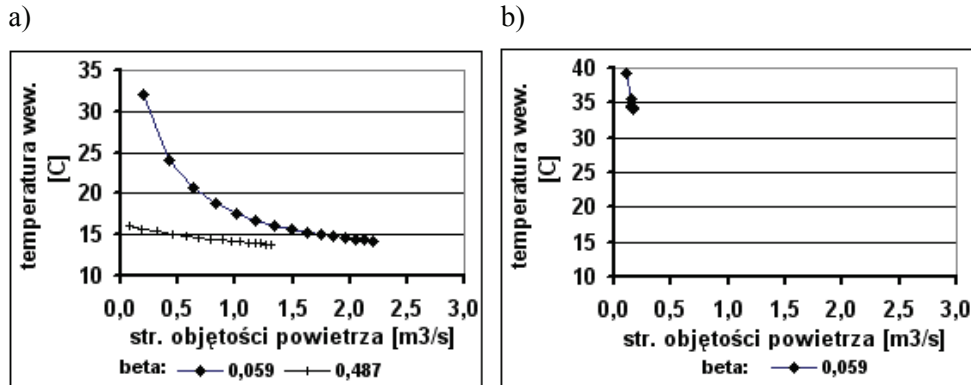
Prędkość wiatru: a) 1 m·s<sup>-1</sup>, b) 3 m·s<sup>-1</sup>

Tablica 5.1. Wpływ wiatru wspomagającego w procesie wymiany powietrza w budynkach o różnej izolacyjności cieplnej przegród wewnętrznych

| współczynnik  | $\beta_1 = 0,059$ | $\beta_2 = 0,487$ | $\beta_3 = 1,129$ |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| brak wiatru (rys. 5.9)                                |                   |                   |                   |
| $\dot{V}$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]          | 0,95              | 0,69              | 0,51              |
| $T_i$ [°C]  | 18,77             | 15,08             | 13,25             |
| wiatr wspomagający – 1 m·s <sup>-1</sup> (rys. 5.10a) |                   |                   |                   |
| $\dot{V}$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]          | 1,05              | 0,88              | 0,77              |
| $T_i$ [°C]  | 17,20             | 14,30             | 12,90             |
| wiatr wspomagający – 3 m·s <sup>-1</sup> (rys. 5.10b) |                   |                   |                   |
| $\dot{V}$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]          | 1,88              | 1,83              | 1,80              |
| $T_i$ [°C]  | 14,80             | 13,40             | 12,30             |

Tablica 5.1 zawiera wyniki wybrane z ciągów wartości otrzymanych dla tego samego punktu obliczeniowego usytuowanego na kolejnych krzywych. Dane pochodzą z rysunków: 5.9, 5.10a, 5.10b. Przedstawione w tablicy 5.1 wartości wskazują na kontrolną rolę wiatru w procesach naturalnej wymiany powietrza.

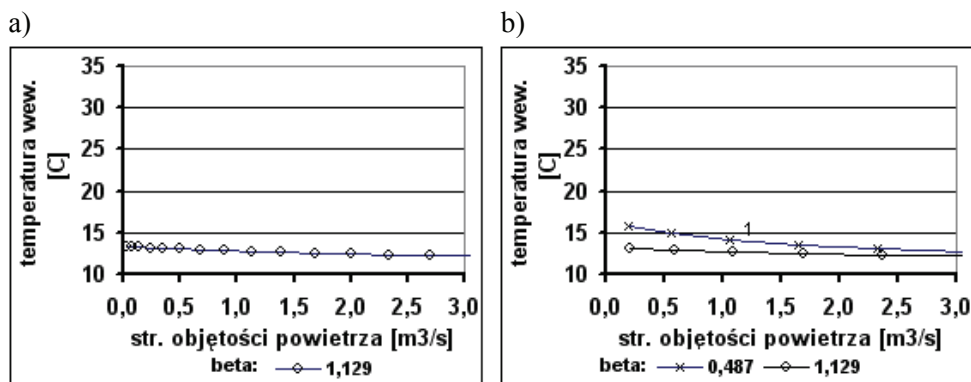
Wspomagający udział wiatru w tym procesie, od pewnej objętości strumienia powietrza wentylacyjnego, niweluje znacząco różnice w temperaturach budynków o różnym stopniu izolacyjności przegród zewnętrznych. We wszystkich trzech budynkach występują jednakowe: moce wewnętrznych źródeł ciepła, zyski słoneczne oraz otwory wentylacyjne.



Rys. 5.11. Wpływ wiatru przeciwnego na przepływ powietrza, skierowanego od dolnego do górnego otworu wentylacyjnego:

a) prędkość wiatru  $-1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; b) prędkość wiatru  $-3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Wiatr, który napływa na przegrodę południową z otworem wentylacyjnym górnym, hamuje bądź odwraca naturalny kierunek przepływu powietrza przez budynek. Rysunek 5.11 ilustruje przypadek, kiedy wiatr ma prędkość jedynie  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  i nie jest w stanie całkowicie pokonać wyporu termicznego źródeł ciepła w budynkach dobrze zaizolowanych cieplnie – ( $\beta = 0,059$ ) i ( $\beta = 0,487$ ). Powoduje jedynie wytłumienie przepływu powietrza. Przepływ odwrotny występuje tylko w budynku o najniższej izolacji termicznej przegród – ( $\beta = 1,129$ ), rys. 5.12. W przypadku budynku o war-



Rys. 5.12. Wpływ wiatru przeciwnego na przepływ powietrza, skierowanego od górnego do dolnego otworu wentylacyjnego:

a) prędkość wiatru  $-1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , b) prędkość wiatru  $-3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

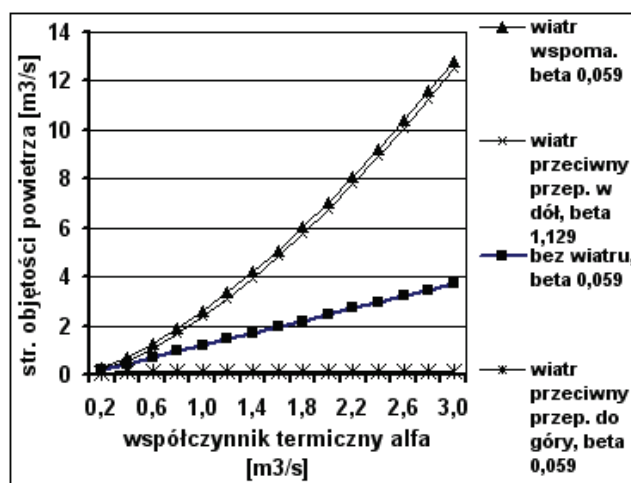
tości współczynnika  $\beta = 0,059$  maksymalną objętość strumienia powietrza, jaki może wystąpić przy istniejących źródłach ciepła i powierzchni otworów, jest strumień objętości niewiele przekraczający  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . W budynku, gorzej zabezpieczonym cieplnie, strumień ten nie przekracza  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , ale warto zauważyć, że do osiągnięcia podobnej temperatury wewnętrznej potrzeba w budynku „cieplejszym” wymienić o 60% więcej powietrza.

Przy prędkości wiatru przeciwnego  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  możliwy jest jedynie znikomy przepływ powietrza do góry przez budynek o współczynniku  $\beta = 0,059$ . Liczba wymian powietrza zawarta jest w granicach  $0,23\text{--}0,36 \text{ w} \cdot \text{h}^{-1}$ , stąd brak możliwości obniżenia temperatury wewnętrznej. W pozostałych dwóch budynkach niższy wypór termiczny nie jest w stanie pokonać spadku ciśnienia wywołanego wiatrem przeciwnym.

Rysunki 5.12a i b przedstawiają przepływ powietrza do dołu. Jest to lustrzane odbicie przepływu powietrza pokazanego na rys. 5.11a i rys. 5.11b. Siła, wynikająca z wyporu termicznego, jest niższa od spadku ciśnienia wywoływanego działaniem wiatru tylko w budynku najslabiej zaizolowanym cieplnie. Natomiast spadek ciśnienia, wytwarzany przez wiatr przy prędkości  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , jest na tyle duży, że zdoła pokonać spadek ciśnienia, generowany różnicą temperatur w budynku scharakteryzowanym także przez współczynnik  $\beta = 0,487$ .

Temperatury wewnętrzne obliczono przy stałej mocy wewnętrznego źródła ciepła oraz średnich, miesięcznych zyskach promieniowania słonecznego i temperatury zewnętrznej jak, dla kwietnia.

Rysunek 5.13 podsumowuje wynik obliczeń w relacji całkowitego strumienia objętości powietrza wentylacyjnego ze strumieniem generowanym siłami wyporu termicznego. Zmianę powierzchni efektywnej otworów ujmował współczynnik termiczny  $\alpha$  (5.9), który zmieniał się o stałą wartość  $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .



Rys. 5.13. Zależność strumienia objętości powietrza od współczynnika wyporu termicznego  $\alpha$  i wiatru, dla omawianych powyżej warunków przepływu. Dane pogodowe, jak dla kwietnia

Przy wietrze przeciwnym, o niewielkiej prędkości –  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , który napływa od strony otworu wylotowego, tylko dobrze izolowane budynki są w stanie utrzymać prawidłowy przepływ powietrza wentylacyjnego. Natomiast utrzymanie takiego kierunku przepływu przy większych prędkościach wiatrów, tj.  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , możliwe jest tylko w budynkach o bardzo dobrej izolacyjności przegród. Są sytuacje, kiedy siły ciśnieniowe, pochodzące od wiatru, zbliżone są do sił wyporu termicznego i wówczas w pomieszczeniu panować będzie bezruch – (rys. 5.13).

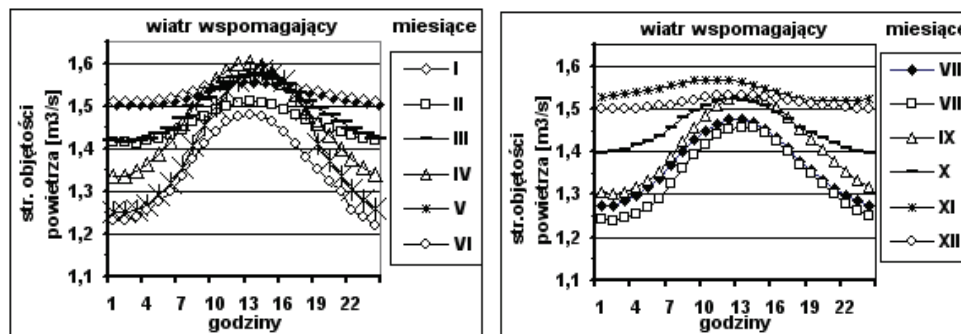
### 5.6. Wyniki obliczeń w obiekcie dwustrefowym

Strumień powietrza wentylacyjnego uzyskano rozwiązując równania (5.49), (5.50), (6.51) numerycznie, przy różnych warunkach początkowych, przyjmując różne wartości strumienia objętości powietrza  $\dot{V}_{\text{pocz}}$ . Temperatury wewnętrzne w strefach budynku obliczono wykorzystując równania (5.52) i (5.53) oraz (5.54) i (5.55). Obliczenia prowadzono przy stałym wydatku energetycznym wewnętrznych źródeł ciepła oraz uśrednionych, miesięcznych zyskach energetycznych, pochodzących z promieniowania słonecznego.

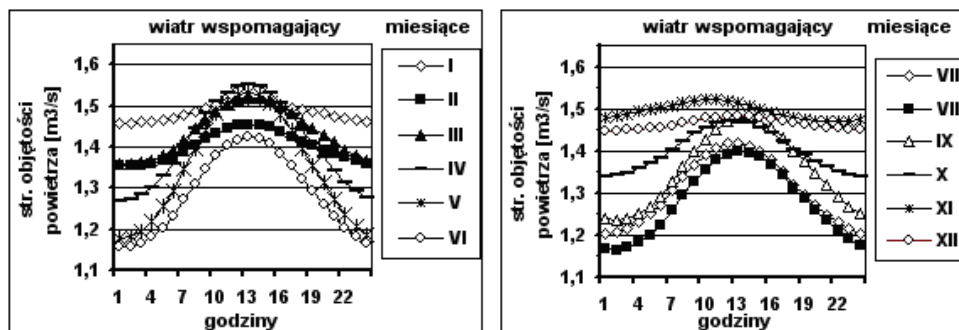
#### 5.6.1. Przepływ powietrza wentylacyjnego intensyfikowany wiatrem

Wyniki obliczeń na rys. 5.14 otrzymano z rozwiązania równania (5.49), które opisuje naturalną wymianę powietrza wspomaganą wiatrem. Poszczególne krzywe wykazują wyraźny wpływ promieniowania słonecznego na przebieg strumienia powietrza w ciągu uśrednionej doby miesiąca. Źródło ciepła ze strefy pierwszej ma stały wydatek energetyczny, a więc i wartości  $B_1$  zależną tylko od temperatury otoczenia. W strefie pierwszej budynku nie ma okna, brak jest więc wspomaganie wewnętrznych źródeł ciepła słonecznymi zyskami energetycznymi. W strefie drugiej wnętrze pozyskuje przez okno promieniowanie słoneczne. Wpływ temperatury otoczenia na przepływ powietrza jest tym znaczniejszy, im większe są jej różnice pomiędzy dniem i nocą. Zjawisko to występuje silniej w miesiącach wiosennych i letnich. Najsilniejszy wpływ wiatru obserwuje się w środku dnia, oraz – generalnie – w miesiącach zimowych. W budynku z 2 centymetrową warstwą izolacyjną wystę-

a)



b)

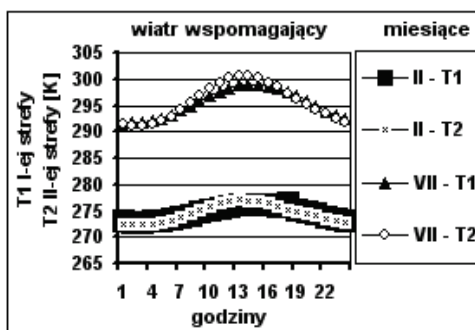


Rys. 5.14. Przebieg dobowy strumienia objętości powietrza wentylacyjnego w kolejnych miesiącach, przy wietrze wspomagającym:

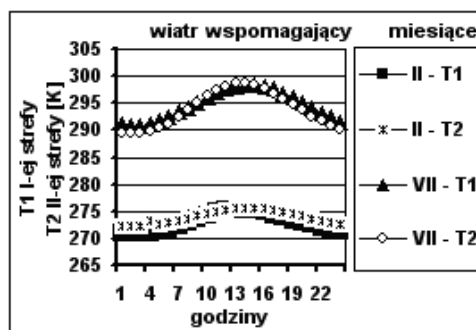
- a) ściany dwustrefowego budynku zaizolowane cieplnie 20 cm styropianu.  
b) ściany dwustrefowego budynku zaizolowane cieplnie 2 cm styropianu.

puje oczywiście intensywniejsza wymiana ciepła z otoczeniem, niż przy 20 cm styropianu. Stąd, przy tych samych mocach źródeł ciepła, temperatura wewnętrzna jest niższa, ale różnice w wielkości badanych strumieni powietrza nie są zbyt duże – (rys. 5.14a i rys. 5.14b).

a)



b)

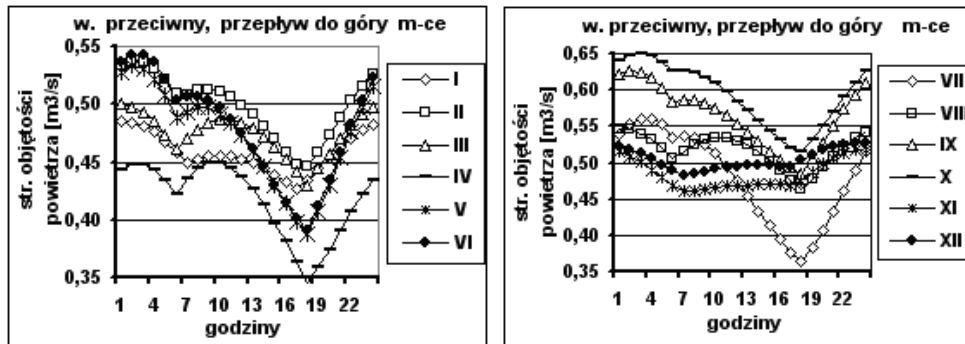


Rys. 5.15. Dobowy przebieg temperatury wewnętrznej w obu strefach budynku dla lutego i lipca, przy wietrze wspomagającym:

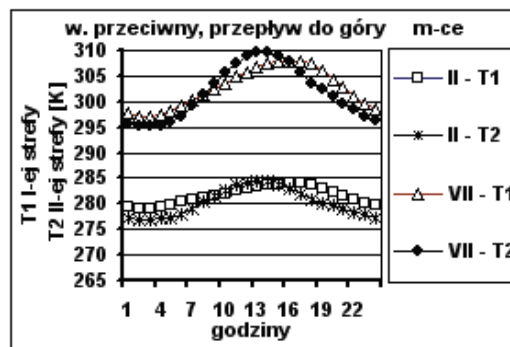
- a) ściany budynku zaizolowane 20 cm styropianu  
b) ściany budynku zaizolowano 2cm styropianu

Temperaturę wewnętrzną, dla wybranych miesięcy – lutego i lipca, przedstawiają wykresy na rys. 5.15. W naszej szerokości geograficznej luty jest miesiącem najzimniejszym, ze średnią temperaturą otoczenia równą ( $-3,26^{\circ}\text{C}$ ) i amplitudą  $1,76^{\circ}\text{C}$ . Lipiec jest miesiącem najcieplejszym – średnia temperatura wynosi  $17,24^{\circ}\text{C}$ , a amplituda  $4,04^{\circ}\text{C}$ . Temperatury w strefach opisują równania (5.52) i (5.53).

### 5.6.2. Przepływ powietrza wentylacyjnego skierowany do góry, tłumiony wiatrem przeciwnym



Rys. 5.16. Dobowy przebieg strumienia objętości powietrza przy wietrze przeciwnym, z przepływem skierowanym do góry. Ściany budynku zaizolowane 20 cm styropianu.



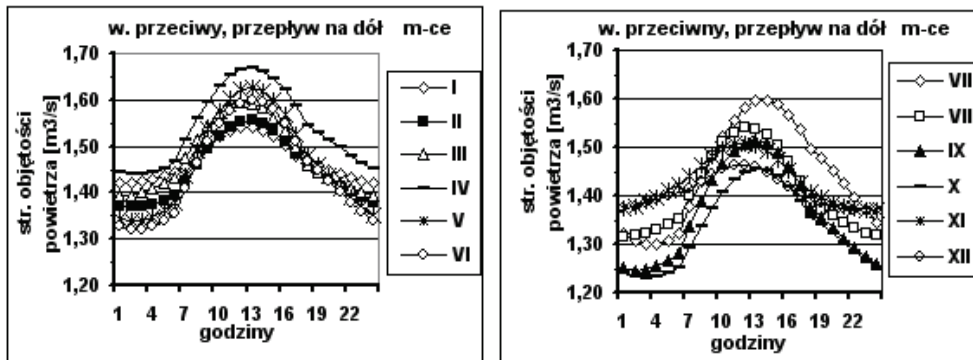
Rys. 5.17. Przebieg temperatury wewnętrznej w obu strefach budynku, dla lutego i lipca, przy wietrze przeciwnym, z przepływem skierowanym do góry. Ściany budynku zaizolowane 20 cm styropianu.

Wyniki obliczeń z rys. 5.16 otrzymano z rozwiązania równania (5.50). Wiatr w tym równaniu tłum naturalną wymianę powietrza. Napływ wiatru skierowany przeciwnie, tj. od strony pierwotnie uznanej za zawietrzną – a więc południową, przeciwdziała wyporowi termicznemu. Jeśli, mimo oddziaływania wiatru, w dalszym ciągu przepływ powietrza skierowany jest ku górze, oznacza to, że relatywny stosunek zaangażowanych w tworzenie przepływu sił przeważa na korzyść różnicy gęstości powietrza. W tych konkretnych warunkach wynikiem rozwiązania równania (5.50), jest jedynie strumień objętości powietrza przy ścianach dobrze izolowanych, tj. 20 cm styropianu. Powstające tu przepływy powietrza są bardzo niewielkie – rys. 5.16, stąd i temperatury wewnętrzne w obu strefach są dużo wyższe (rys. 5.17) niż te, które panują przy wietrze wspomaganym – rys. 5.15.

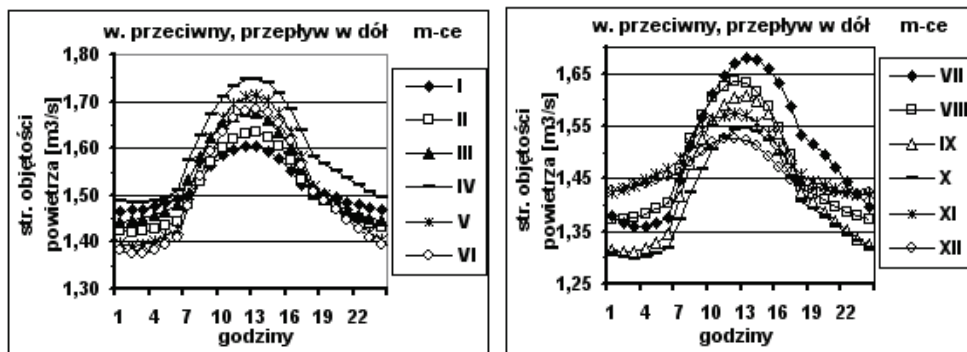
### 5.6.3. Przepływ powietrza wentylacyjnego skierowany ku dołowi, wywołany wiatrem przeciwnym

Wyniki obliczeń z rys. 5.18–5.21 otrzymano przy wartości początkowej  $\dot{V}_{\text{pocz.}} = 20$  oraz  $\dot{V}_{\text{pocz.}} = 0,5$ . Jeśli siły wymuszające, które pochodzą z wyporu termicznego, ustępują tym, wytwarzanym przez wiatr, który działa na otwór górny, to przepływ powietrza jest zawsze skierowany na dół. Ten charakter przepływu opisuje równanie (5.51), a temperatury w strefach – równania (5.54) i (5.55). Rysunki 5.18a i rys. 5.18b pokazują wyniki obliczeń strumienia objętości powietrza wentylacyjnego uzyskane przy  $\dot{V}_{\text{pocz.}} = 20$ .

a)

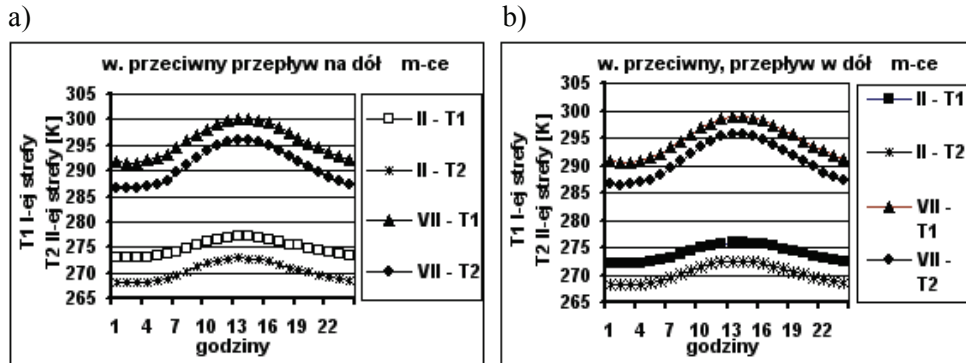


b)

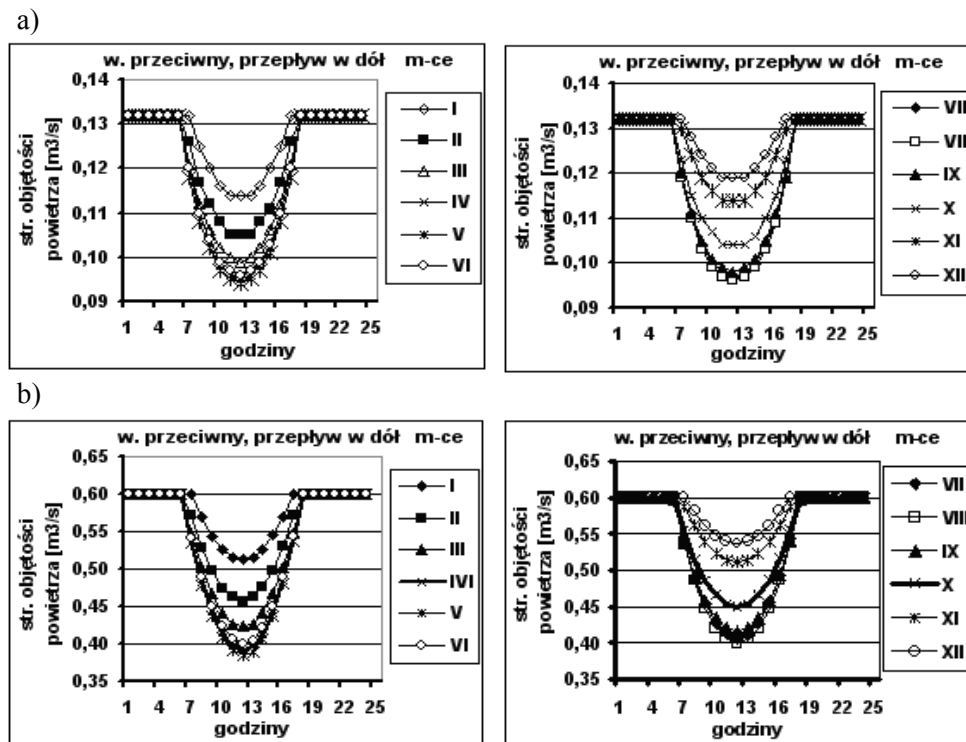


Rys. 5.18. Dobowy przebieg strumienia objętości powietrza wentylacyjnego w kolejnych miesiącach przy wietrze przeciwnym, z przepływem powietrza skierowanym na dół,  $\dot{V}_{\text{pocz.}} = 20$ :

- a) ściany dwustrefowego budynku zaizolowane cieplnie 20 cm styropianu,
- b) ściany dwustrefowego budynku zaizolowane cieplnie 2 cm styropianu

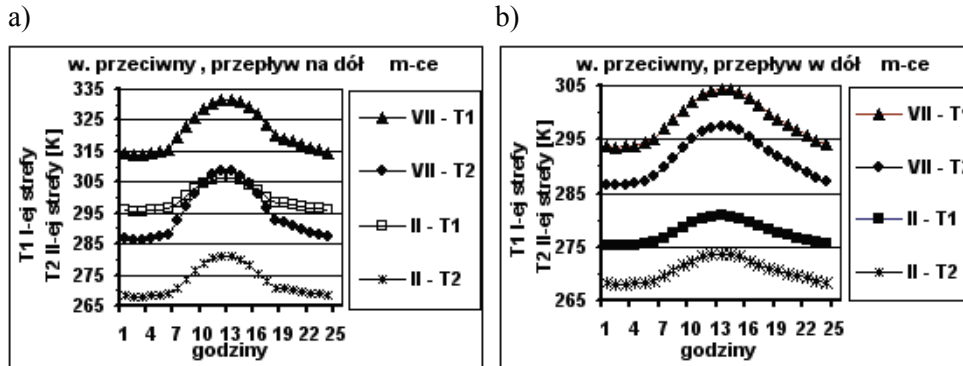


Rys. 5.19. Dobowy przebieg temperatury wewnętrznej w obu strefach budynku dla lutego i lipca, przy wietrze przeciwnym, z przepływem skierowanym na dół:  $\dot{V}_{pocz.} = 20$ : a) ściany budynku zaizolowane cieplnie 20 cm styropianu, b) ściany budynku cieplnie zaizolowano 2 cm styropianu



Rys. 5.20. Dobowy przebieg objętościowego strumienia powietrza wentylacyjnego dla kolejnych miesięcy przy wietrze przeciwnym, z przepływem powietrza skierowanym na dół przy warunkach początkowych  $\dot{V}_{pocz.} = 0,5$ : a) ściany dwustrefowego budynku są cieplnie zaizolowane 20 cm styropianu. b) ściany dwustrefowego budynku są cieplnie zaizolowane 2 cm styropianu





Rys. 5.21. Dobowy przebieg temperatury wewnętrznej w obu strefach budynku dla lutego i lipca, przy wietrze przeciwnym, z przepływem skierowanym na dół.

$$\dot{V}_{\text{pocz}} = 0,5$$

- a) ściany budynku są cieplnie zaizolowane 20 cm styropianu.  
 b) ściany budynku są cieplnie zaizolowane 2 cm styropianu

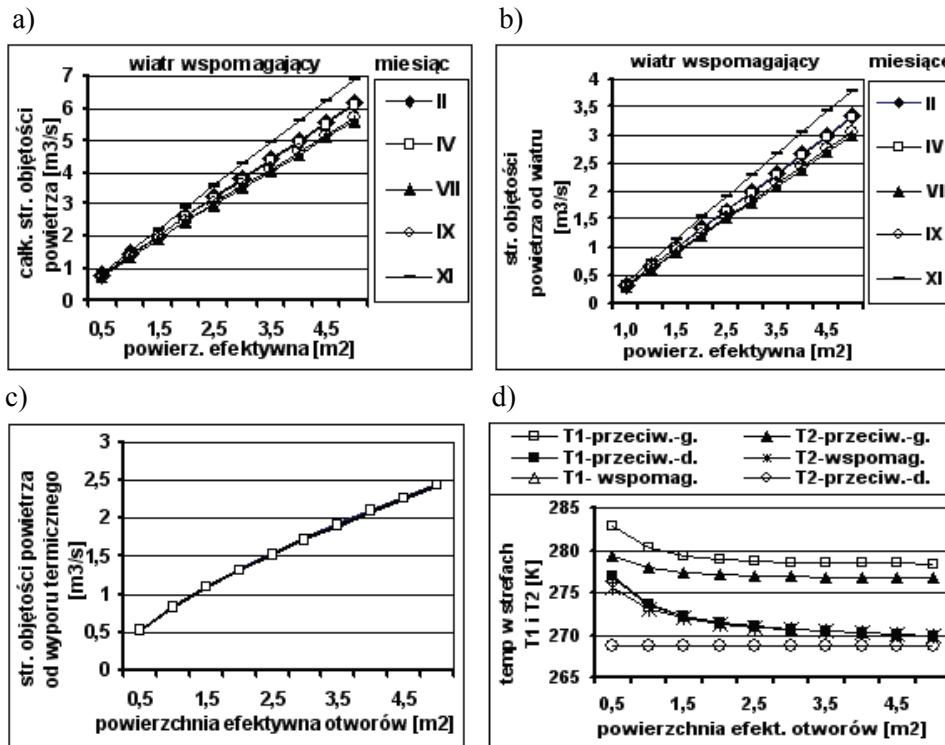
Wyniki te (rys. 5.18, 5.19) mogą wzbudzać wątpliwości, gdyż niewiele różnią się od uzyskanych w obecności wiatru wspomagającego. Ale budowa równania (5.51), jak wskazano powyżej, zezwala na otrzymanie wielokrotnych miejsc zerowych funkcji. Za to wyniki obliczeń uzyskane przy  $\dot{V}_{\text{pocz}} = 0,5$ , a przedstawione na rys. 5.20 i rys. 5.21 różnią się bardzo tak w charakterze przepływu jak i intensywności. Wybór właściwego rozwiązania, realnego fizycznie i stabilnego, dokonuje się po dalszych obliczeniach, np. przy zmienianej powierzchni efektywnej otworów wentylacyjnych.

Dodatkowo rozwiązano równanie (5.49) przy różnych powierzchniach otworów wentylacyjnych, począwszy od powierzchni efektywnej równej od  $0,5\text{m}^2$  do  $5\text{m}^2$ . W obliczeniach zmianę powierzchni przyjęto co  $0,5\text{m}^2$ . Przy wietrze wspomagającym w budynku izolowanym cieplnie 20cm styropianu, otrzymano całkowity strumień powietrza wentylacyjnego, który jest wynikiem działania wszystkich sił działających, opisanych współczynnikami:  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  – rys. 5.22a.

Natomiast rys. 5.22b pokazuje wymianę powietrza, która powstaje w wyniku jedynie działania wiatru wspomagającego, a rys. 5.22c wymianę powietrza generowaną różnicą gęstości powietrza. Obliczenia wykonano przy wartości parametrów pogody o godz. 6 rano. O tej godzinie promieniowanie słoneczne ma bardzo mały wpływ na omawiany proces i dlatego strumienie powietrza nakładają się na siebie. Wartość współczynnika  $\alpha$  wynika głównie z  $E_1$  – mocy źródła ciepła w strefie pierwszej.

Rysunek 5.22d przedstawia temperaturę w obu strefach w lutym, dla wszystkich rodzajów przepływu (równania (5.49), (5.50), (5.51)). W lutym, o godz. 6<sup>00</sup>, na temperaturę  $T_1$  i  $T_2$  wpływają jedynie stałe źródła ciepła  $E_{1i} = 9 \cdot 10^3\text{W}$  i  $E_{2i} = 1 \cdot 10^2\text{W}$  i dlatego wykres pokazuje „bazowe” wartości temperatury w strefach.

Przy przepływach odwrotnych, w strefie drugiej, temperatura będzie zawsze zbliżona do temperatury otoczenia. Po przekroczeniu pewnej powierzchni efektywnej temperatura w strefach w zasadzie nie ulega zmianie.



Rys. 5.22. Relacje pomiędzy powierzchnią efektywną otworów wentylacyjnych a strumieniem objętości powietrza:

- a) całkowitym, b) kształtowanym wiatrem wspomagającym,  
c) wyporem termicznym, d) temperatury w strefach budynku  
w lutym dla trzech rodzajów przepływów.

### 5.7. Wielokrotne miejsca zerowe funkcji opisującej model dwustrefowy – histereza przepływu

Przy tym samym zestawie danych wejściowych, otrzymuje się wielokrotne rozwiązania równań (5.49), (5.50), (5.51) w stanie ustalonym. Nieliniowa budowa równań modelu powoduje, że wynikiem rozwiązania funkcje są różne wartości strumieni objętości powietrza wentylacyjnego oraz odpowiadające im temperatury wewnętrzne. Zjawisko to jest często obserwowane w badaniach poligonowych.

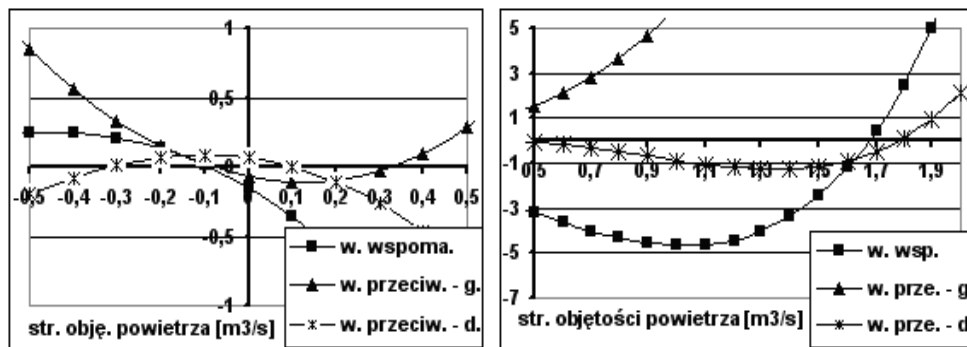
Poniżej, dla ilustracji tego zjawiska, przedstawiono przykładowe wyniki rozwiązań w budynku dwustrefowym na rys. 5.23–5.25 oraz w tablicy 5.2. Przepływ powietrza i temperaturę wewnętrzną w strefach analizowano w budynku izolowanym cieplnie 20 cm, bądź 2 cm styropianu. Obliczenia przeprowadzono przy róż-

nych powierzchniach otworów wentylacyjnych:  $1,5 \text{ m}^2$ ,  $1 \text{ m}^2$ ,  $0,2 \text{ m}^2$  oraz wartościach średnich parametrów pogody. Uzyskano także wielokrotne rozwiązania równań (5.49), (5.50), (5.51) przy podniesionej do  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , hipotetycznej w lipcu, prędkości wiatru tak północnego, jak i południowego.

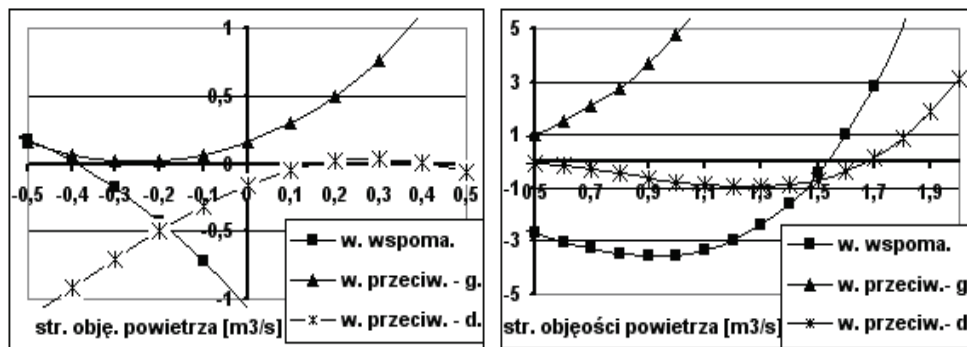
Przyjęte do obliczeń numerycznych wartości parametrów klimatu odpowiadają średnim warunkom pogodowym panującym w lipcu o godz.  $14^{00}$  i wynoszą:

- temperatura otoczenia  $T_0 = 294,35 \text{ K}$ ,
  - prędkość wiatru północnego, wspomagającego przepływ  $2,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $\gamma = 0,869$ ).
  - prędkość wiatru południowego, tłumiącego lub odwracającego przepływ  $2,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $\gamma = 0,715$ ),
  - energetyczne zyski słoneczne  $E_s = 3,56 \cdot 10^3 \text{ W}$  (z  $28 \text{ m}^2$  okna),
- moc wewnętrznych źródeł ciepła w strefach:
- $E_1 = 9 \cdot 10^3$  ( $\alpha_1 = 0,68$ ),
  - $E_2 = 1 \cdot 10^2$  ( $\alpha_2 = 0,45$ ).

a)



b)



Rys. 5.23. Wielokrotne miejsca zerowe funkcji przy izolacji przegród budynku:  
a) 20 cm, b) 2 cm styropianu

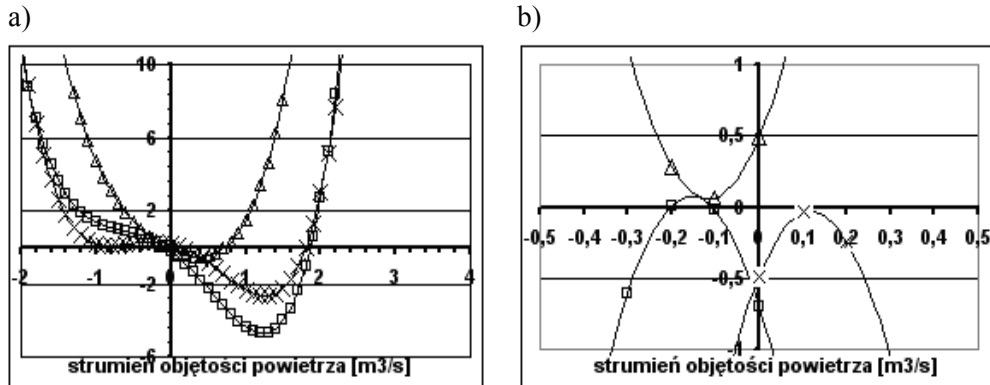
Wykresy, na rysunkach: 5.23a i 5.23b z prawej strony, są kontynuacją wykresów z lewej strony, których zakres skali zawiera się w przedziale  $(-0,5) - (+0,5)$ .

Tablica 5.2 Wykaz rozwiązań wielokrotnych funkcji dla strumienia objętości powietrza i temperatur w strefach budynku z wykresów na rys. 5.23–5.25

| funkcja wiatr  | kierunek przep.pow. | $\dot{V}$ [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] | $T_1$ [K] | $T_2$ [K] |
|--|---------------------|--|-----------|-----------|
| budynek izolowany 20 cm styropianu, $A_{\text{ef}} = 1 \text{ m}^2$ (rys. 5.23a)   |                     |  |           |           |
| wspomaga.  | ↑                   | 1,508  | 298,8     | 300,7     |
| tłumiąca   | ↑ „g”               | 0,335  | 310,1     | 312       |
| odwraca.-I   | ↓ „d”               | 0,111  | 307,8     | 330,8     |
| odwraca.-II  | ↓ „d”               | 1,717  | 296,0     | 299,9     |
| budynek izolowany 2 cm styropianu, $A_{\text{ef}} = 1 \text{ m}^2$ (rys. 5.23b)  |                     |  |           |           |
| wspomaga.  | ↑                   | 1,456  | 298,3     | 298,6     |
| tłumiąca   | ↑ „g”               | przepływ nie zachodzi                          |           |           |
| odwraca.-I   | ↓ „d”               | 0,157  | 307,7     | 298,3     |
| odwraca.-II  | ↓ „d”               | 0,424  | 304,3     | 297,2     |
| odwraca.-III   | ↓ „d”               | 1,780  | 298,7     | 295,6     |
| budynek izolowany 20 cm styropianu, $A_{\text{ef}} = 1,5 \text{ m}^2$ (rys. 5.24a)   |                     |  |           |           |
| wspomaga.  | ↑                   | 1,870  | 293,3     | 292,5     |
| tłumiąca   | ↑ „g”               | 0,425  | 298,6     | 290,9     |
| odwraca.-I   | ↓ „d”               | 0,125  | 331,7     | 319,1     |
| odwraca.-II  | ↓ „d”               | 2,155  | 296,3     | 293,3     |
| budynek izolowany 20 cm styropianu,<br>$A_{\text{ef}} = 1,5 \text{ m}^2$ , $v = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 5.24b):<br>wynikiem podniesienia prędkości wiatru z obu wykorzystywanych kierunków brak jest jakichkolwiek pierwiastków zerowych |                     |  |           |           |
| budynek izolowany 20 cm styropianu,<br>$A_{\text{ef}} = 0,2 \text{ m}^2$ , $v = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 5.25a)   |                     |  |           |           |
| wspomaga.  | ↑                   | 1,155  | 300,1     | 301,8     |
| tłumiąca   | ↑ „g”               | przepływ nie zachodzi                          |           |           |
| odwraca.-I   | ↓ „d”               | 0,157  | 302,2     | 296,5     |
| budynek izolowany 2 cm styropianu,<br>$A_{\text{ef}} = 0,2 \text{ m}^2$ , $v = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 5.25b):<br>przy przyjętej wartości wiatru i powierzchni otworów brak jest jakichkolwiek miejsc zerowych funkcji                   |                     |  |           |           |

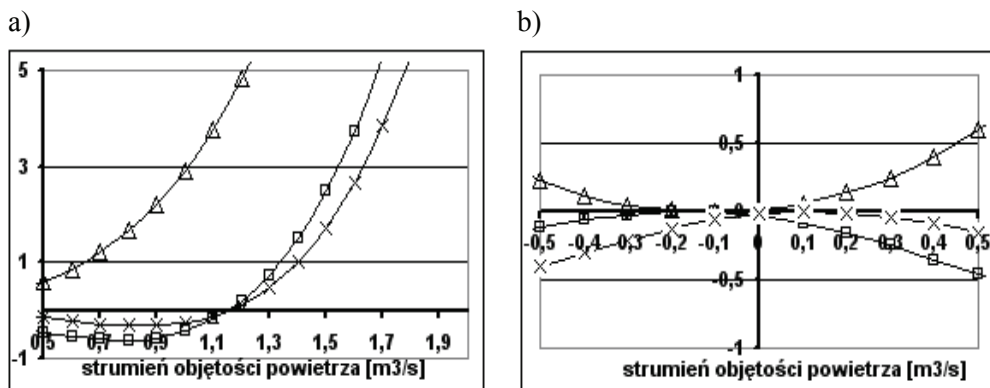
Przebiegi funkcji na rys. 5.24 i rys. 5.25 zaznaczone są różnymi symbolami graficznymi.

Funkcja wykorzystująca wiatr: wspomagający – □,  
przeciwny z przepływem do góry – Δ,  
przeciwny z przepływem w dół – ×



Rys. 5.24. Pierwiastki wielokrotne równań dla trzech rodzajów przepływów wentylacyjnych w lipcu, izolacja ścian – 20 cm styropianu:

a)  $A_{ef} = 1,5 \text{ m}^2$ , wiatr średni, b)  $A_{ef} = 1 \text{ m}^2$ ,  $v = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Rys. 5.25. Pierwiastki wielokrotne równań dla trzech rodzajów przepływów

a) przy 20 cm styropianu,  $A_{ef} = 0,2 \text{ m}^2$ ,  $v = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

b) brak rozwiązania przy izolacji 2 cm styropianu,  $A_{ef} = 0,2 \text{ m}^2$ ,  $v = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

## 5.8. Podsumowanie

Główną zaletą modeli Li, Delsante jest matematyczny opis naturalnej wymiany powietrza w budynkach, której intensywność wynika także z oporu cieplnego przegród zewnętrznych. Opis modelu uwzględnia więc pośrednio wymianę ciepła przez przegrody budynku. Rolę wymuszenia odgrywa temperatura otoczenia i promieniowanie słoneczne. Stąd też wynikiem rozwiązania równań bilansowych, tworzących modele są wielkości różnicujące niezależnie wpływ zarówno parametrów klimatu, jak i izolacyjności przegród zewnętrznych obiektu, na intensywność wymiany powietrza wentylacyjnego.

Przyjęty opis modeli zezwala także na badanie przepływów powietrza, tłumionych wiatrem przeciwnym, lub wręcz zmieniających kierunek przepływu na odwrotny, właśnie pod wpływem wiatru przeciwnego. Nie narzucają także wartości

temperatury wewnętrznej. Jej wartość jest wynikiem jednoczesnego zachodzenia procesów ciepłno-przepływowych w badanym obiekcie budowlanym.

Modele matematyczne, rozwiązywalne analitycznie, a do takich należy model wymiany powietrza w budynku jednostrefowym, które opisują wspólne i wzajemnie zależne zachodzenie procesów ciepłno-przepływowych są nadal pożądanym narzędziem badawczym. Służą one szerokiej i dogłębnej analizie wzajemnych oddziaływań i wpływów, nawet w przypadku nałożonych na model uproszczeń, które oczywiście nie mogą zniekształcać opisywanego procesu. I chociaż modele Li, Del-sante dostarczają informacje dotyczących stanu ustalonego, to jednak należą do tych wyjątków, które są w stanie zaspokoić, w pewnym zakresie, oczekiwania badaczy tych procesów.

Matematyczny opis badanego procesu, podany w modelach, zawiera nieliniowe relacje pomiędzy naturalnymi siłami, które kształtują w dużej mierze przepływy powietrza wentylacyjnego i wpływają na ich charakter. Stąd wynikiem rozwiązania tych równań, przy zmiennych warunkach początkowych, jest histereza przepływu. W literaturze przedmiotu można się natknąć na informacje pochodzące zarówno od użytkowników pakietów symulacyjnych, jak i badaczy wykonujących pomiary poligonowe. Informacje te dotyczą wyników rozwiązań i pomiarów przepływów o różnym charakterze i strumieniu objętości powietrza, które powstają w tych samych warunkach klimatycznych. Rodzi się więc pytanie, w jakim zakresie ten proces występuje w rzeczywistości i co jest przyczyną jego powstawania? W jaki sposób można nim sterować i jak będzie wpływał na działanie układu hybrydowego? Istnieje więc uzasadniona potrzeba stworzenia wiarygodnej metody do badania tego zjawiska. Metody komputerowe, stosowane do badania przepływów powietrza w budynkach wielostrefowych, wymagają w dalszym ciągu dużego nakładu pracy po to, by stać się narzędziami, które są w stanie sprostać badaczom. Użytkownicy stosowanych obecnie narzędzi sygnalizują, w przypadku metody Newtona-Raphsona, problemy ze zbieżnością, jak i rozbieżnością, rozwiązań. Jednym z powodów występowania tego procesu, twierdzą np. twórcy programu CHEMIX, są właśnie zjawiska z histerezą przepływów. Tylko wiedza i doświadczenie, nabyte w badaniach opisywanych zjawisk, pozwala zrozumieć te procesy, właściwie je interpretować i unikać błędów w aplikacji.

Przykładem rodzących się pytań są wyniki obliczeń podane na rys. 5.18–5.21 oraz przedstawione na rys. 5.23, 5.24, 5.25, tablica 5.2. Weryfikacja tych wyników nie jest oczywista. Wybór realnego, stabilnego rozwiązania ułatwia wprowadzenie parametrów klimatu w postaci harmonicznego, ale nie musi przesądzać o wyborze rozwiązania. Zdarza się, że poprawny wybór może być dokonany po wieloetapowej analizie wyników, np. poprzez zmianę powierzchni otworów wentylacyjnych. Ta wieloetapowa procedura jest niezbędna, gdyż np. badania modelowe wykazały, że wyniki uznawane za poprawne i zgodne z powszechnym odczuciem, szczególnie przy przepływach odwrotnych, nie są realne fizycznie.

## 6. Nieustalony, jednowymiarowy przepływ ciepła oraz powietrza w obiektach o różnej strukturze materiałowej przegród.

### Założenia do autorskiego programu komputerowego

#### 6.1. Warunki równowagi termodynamicznej budynku

Badanie równowagi termodynamicznej budynku wymaga jednoczesnego uwzględnienia procesu wymiany ciepła oraz wymiany masy w postaci powietrza wentylacyjnego pomiędzy budynkiem a jego otoczeniem zewnętrznym. Oba te procesy są wynikiem oddziaływania środowiska zewnętrznego na obiekt o danej strukturze materiałowej przegród oraz warunków panujących w jego wnętrzu.

Do czynników zewnętrznych, które wymuszają nieustaloną wymianę ciepła i powietrza w obiekcie, należą parametry klimatu, a więc: bezpośrednie, rozproszone i odbite promieniowanie słoneczne, temperatura zewnętrzna, prędkość i kierunek wiatru oraz wilgotność powietrza. Związana ze stanem środowiska zewnętrznego koncentracja zanieczyszczeń waży także na wymianie powietrza. Wymuszeniami wewnętrznymi procesów ciepłno-przepływowych są: źródła ciepła, do których należą użytkownicy obiektu, eksploatowane urządzenia, w tym sztuczne oświetlenie. Udział w tych procesach ma także wilgotność i zanieczyszczenia powietrza wewnętrznego. Dla danej lokalizacji budynku parametry pogody są niezmiennie. Natomiast mikroklimat wewnętrzny zmienia się w zależności od przeznaczenia obiektu oraz potrzeb i upodobań jego użytkowników.

Obiekt budowlany, wraz z otoczeniem zewnętrznym, w kontekście powyższej klasyfikacji, można zdefiniować jako kompleksowy układ, w którym zachodzą wzajemnie powiązane procesy przepływowe ciepła i masy. Wymiana ciepła pomiędzy budynkiem a jego otoczeniem zewnętrznym oraz pomiędzy strefami budynku, wynika z przewodzenia, konwekcji i promieniowania.

Definiowanie procesów cieplnych odbywa się na następujących zasadach, ciepło przekazywane jest na drodze:

- przewodzenia przez przegrody budynku, zarówno pomiędzy wnętrzem pomieszczenia a otoczeniem zewnętrznym budynku, jak i pomiędzy strefami wewnętrznymi,
- promieniowania i konwekcji naturalnej lub mieszanej, która zachodzi pomiędzy powierzchniami wewnętrznymi przegród, użytkownikami, wyposażeniem, itd., a powietrzem wewnętrznym,
- konwekcji wymuszonej, z uwagi na wiatr, pomiędzy powierzchniami zewnętrznymi przegród budynku a powietrzem zewnętrznym,
- promieniowania wysokiej częstotliwości, którego źródłem jest Słońce,
- promieniowania długofalowego, pomiędzy powłoką budynku a niebem i gruntem.

Przepływ powietrza odbywa się przez nieszczelności w ścianach, przez okna i kontrolowane otwory wentylacyjne oraz pomiędzy strefami wewnątrz obiektu.

Opis tych procesów, w postaci relacji pomiędzy parametrami zewnętrznymi i wewnętrznymi, poprzez zmienne stanu, definiuje równowagę termodynamiczną układu. Zmiennymi stanu są: ciśnienie, temperatura, wilgotność, koncentracja zanieczyszczeń. Badanie procesów termodynamicznych, zachodzących w obiekcie budowlanym, wymaga rozwiązania dwóch typów równań różnych z fizycznego punktu opisu. Pierwsze z równań opisuje: dyfuzję (przewodzenie ciepła), konwekcję, promieniowanie oraz dyfuzję masy. Drugie to równania bilansowe dla energii i masy.

Budynek z punktu widzenia termodynamicznego stanowi szereg powiązanych z sobą układów. Tymi układami mogą być: pomieszczenia, ściany wewnętrzne i zewnętrzne, wyposażenie itp. Równowaga termodynamiczna każdego z tych systemów może być zdefiniowana z pomocą takich parametrów jak: ciśnienie, temperatura, masa lub koncentracja różnych związków chemicznych itp. Powiązanie te przedstawione są na rysunku 6.1, a bilans, energetyczny i masowy pomieszczenia przedstawia się następująco [101, 108]:

$$V \cdot \rho_i \cdot c_v \cdot \frac{dT_i}{dt} = \Phi + \sum_{l=1}^n h_{l_i} \cdot F_l \cdot (T_{s_l} - T_o) + \sum_{K=1}^m U_{ok_K} \cdot A_{ok_K} \cdot (T_o - T_i) + \dot{V}_m \cdot c_p \cdot (T_o - T_i) \quad (6.1)$$

$$\dot{V}_m = C_d \cdot A \cdot \rho_o \cdot \sqrt{\left| 2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_o}{T_o} \pm 2\Delta p_v \right|} \quad (6.2)$$

Lewa strona wyrażenia (6.1) przedstawia zmianę energii wewnętrznej powietrza o temperaturze  $T_i$ , w pomieszczeniu o objętości  $V$ .

Prawa strona bilansu (6.1) składa się z następujących członów:

- Pierwszy człon prawej strony bilansu cieplnego budynku (6.1) wyraża algebraiczną sumą strumieni ciepła dopływających lub traconych przez obiekt.

$$\Phi = \Phi_{gr} + \Phi_o + \Phi_u - \Phi_p \quad (6.3)$$

Składowymi sumy pierwszego członu równania (6.3) są następujące strumienie ciepła:

$\Phi_{gr}$  – z urządzeń cieplnych, urządzeń zasilanych elektrycznie, grzejników itp.,

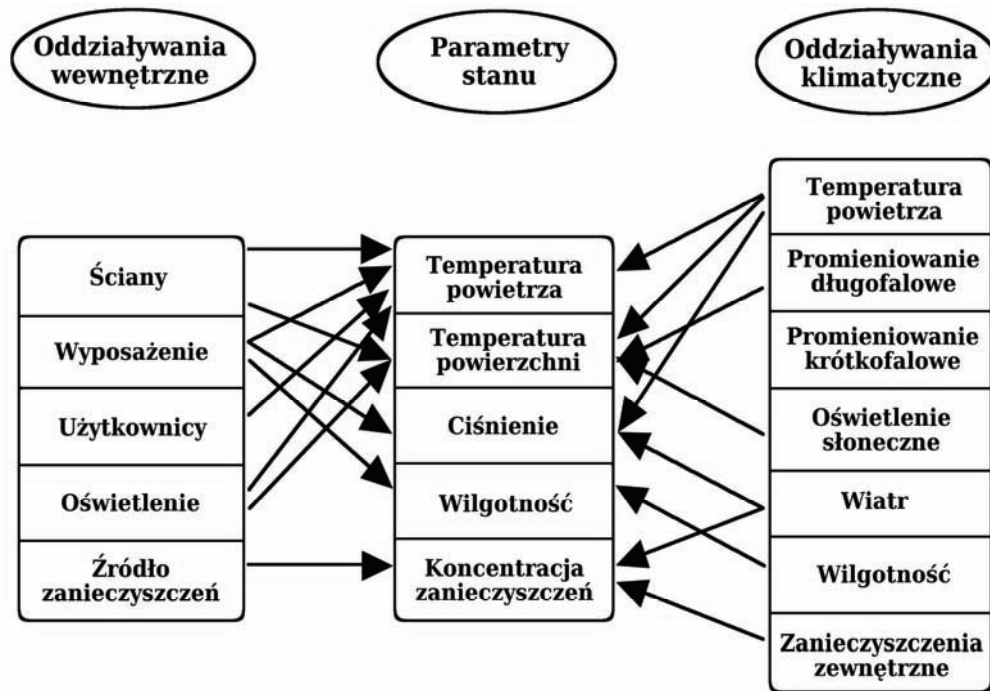
$\Phi_o$  – krótkofalowego promieniowania – głównie jest to promieniowanie słoneczne, pozyskiwane za pośrednictwem przegród przezroczystych,

$\Phi_u$  – od użytkowników pomieszczenia,

oraz

$\Phi_p$  – straty ciepła do podłoża, o ile budynek posadowiony jest na gruncie.





Rys. 6.1. Oddziaływania pomiędzy parametrami, charakteryzującymi stan budynku

- Drugi człon definiuje strumień ciepła wymieniane pomiędzy powietrzem w pomieszczeniu a ograniczającymi go ścianami oraz elementami wyposażenia wewnątrz (w tym ścianki działowe). Powierzchnie wymiany oznaczone przez  $F_i$ , współczynniki wymiany ciepła przez  $h_i$ , a temperatura powierzchni przez  $T_{s_i}$ .
- Trzeci człon opisuje strumień ciepła, przenikające przez okna pomieszczenia z zewnątrz. Okna mają powierzchnię  $A_{ok}$  i współczynnik przenikania ciepła  $U_{ok}$ .
- Czwarty człon wyraża zmianę entalpii, związaną ze strumieniem masowym powietrza wentylacyjnego, o natężeniu przepływu  $\dot{V}_m$  [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]. Powietrze wpływa do pomieszczenia przy temperaturze otoczenia  $T_o$  i opuszcza je przy temperaturze  $T_i$ .

Strumień wymiany konwekcyjnej, pomiędzy powietrzem w pomieszczeniu a każdą z otaczających go ścian, jest zależny od temperatury ich powierzchni, dla których bilans energetyczny przedstawia się następująco:

$$-\lambda \cdot \text{grad}T|_s = h_i \cdot (T_s - T_i) - \alpha_s \cdot \Phi_o + \Phi_{pr} \quad (6.4)$$

gdzie:  $\lambda$  jest współczynnikiem przewodzenia ciepła warstwy ściany bezpośrednio przy powierzchni,  $\alpha_s$  – współczynnikiem absorpcyjności ściany,  $\Phi_{pr}$  – strumień promieniowania długofalowego, wymienianego z innymi powierzchniami w pomieszczeniu.

## 6.2. Założenia modelowe, zakres i możliwości autorskiego programu komputerowego

Podstawowym celem pracy jest badanie wpływu warunków otoczenia oraz struktury ścian wewnętrznych i zewnętrznych na wysokość temperatury, panującej w obiektach budowlanych oraz intensywność wymiany powietrza wentylacyjnego. Poprawne wyznaczenie ilości powietrza wentylacyjnego, przepływającego przez budynek, nie jest możliwe bez jednoczesnego modelowania procesu wymiany ciepła pomiędzy budynkiem, a jego otoczeniem. W celu badania tej relacji został stworzony autorski program komputerowy, niezależnie dla obiektu jednostrefowego i dwustrefowego, który umożliwia jednoczesne modelowanie obu tych procesów, tj. zarówno wymiany ciepła, jak i powietrza wentylacyjnego. Algorytm obliczeń opiera się na metodzie różnic skończonych. W jego procedurze obliczeniowej wykorzystano zabieg sprzężenia zwrotnego w odniesieniu do temperatury wewnętrznej i tej, wynikającej z wymienianego powietrza wentylacyjnego. Procesy generowane za pomocą programu autorskiego w budynkach z naturalną wentylacją, są nieustalonymi procesami wymiany ciepła i powietrza. Przedstawia się je m.in. w postaci dobowych przebiegów temperatury wewnętrznej, w warstwach przegród budowlanych oraz intensywności przepływu powietrza wentylacyjnego.

W programie wykorzystano przetworzone ciągi meteorologiczne temperatury otoczenia, prędkości i kierunku wiatru oraz promieniowania słonecznego dla Warszawy. Wszystkie parametry klimatu, jak i te wymienione powyżej, cechuje zmienność w czasie doby. Składowe funkcje harmonicznej temperatury otoczenia są podane w [28, 30], a prędkości ośmiu kierunków napływu wiatru w rozdziale 3.

Wartość strumienia promieniowania słonecznego, absorbowanego przez ścianę, a także przenikającego przez okna, jest funkcją czasu i orientacji ściany oraz okna w przestrzeni. Algorytm obliczeniowy programu wymagał przygotowania danych dotyczących średniej wartości strumienia promieniowania słonecznego, bezpośredniego i rozproszonego, który pada na płaszczyznę poziomą w kolejnych miesiącach. Zbiory te, w każdym miesiącu, zawierają wartości określone co 15 minut. W programie wartości strumienia były aproksymowane liniowo. Dla płaszczyzn pionowych, zbiory promieniowania, zostały przekształcone zgodnie z zależnościami podanymi w rozdziale 3.

Warunki w pomieszczeniu określają dobowe przebiegi temperatury powietrza wewnętrznego oraz strumienie objętości powietrza wentylacyjnego lub liczby wymian powietrza.

Na temperaturę powietrza wewnątrz pomieszczenia bezpośredni wpływ mają:

- ciepło wymieniane ze ścianami zewnętrznymi,
- ciepło wymieniane na drodze przewodzenia i konwekcji przez okna,

- ciepło wynikające ze strumienia promieniowania słonecznego, przenikającego przez okna,
- straty ciepła do gruntu,
- ciepło wymieniane ze ścianami wewnętrznymi (związane z akumulacją ciepła wewnątrz pomieszczenia),
- strumień powietrza wentylacyjnego,
- moc źródeł ciepła.

Powietrze wentylacyjne wpływa i wypływa wyłącznie poprzez otwory umieszczone przy podłodze i pod sufitem pomieszczenia. Kierunek przepływu powietrza przez pomieszczenie zdeterminowany jest prędkością oraz kierunkiem napływu wiatru na budynek. Stąd też może odbywać się od dolnego do górnego otworu wentylacyjnego, jak i od górnego do dolnego.

Na intensywność wymiany powietrza wentylacyjnego mają wpływ:

- różnica gęstości powietrza zewnętrznego i powietrza wewnątrz pomieszczenia, wyrażająca się różnicą temperatur,
- prędkość i kierunek wiatru.

Liczba parametrów, opisujących badane procesy cieplno-przepływowe, w budynkach o różnej strukturze materiałowej przegród, wymusza zastosowanie szeregu uproszczeń. Nie wprowadzenie ich utrudniłoby lub wręcz uniemożliwiłoby jednoznaczną, jakościową analizę zachodzących tu zjawisk, a w szczególności wpływu struktury budynku na procesy wentylacji. I tak:

- Pominięto wpływ temperatury oraz wpływ prędkości i kierunku napływu powietrza na ścianę – na współczynnik przejmowania ciepła po zewnętrznej stronie budynku i przyjęto jego stałą, normową wartość. W rozpatrywanych przedziałach temperatury parametry powietrza, które wpływają na wielkość współczynnika przejmowania, zmieniają się pomijalnie mało. Znacznie większe, na poziomie 15%, są wahania wartości współczynnika przejmowania ciepła pod wpływem zmian prędkości wiatru.
- Założono stały współczynnik przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej; w obu wypadkach zastosowano różne współczynniki przejmowania ciepła dla ścian pionowych i poziomych, zgodnie z w/w uwagą.
- Założono, że powietrze w pomieszczeniu ma jednolitą temperaturę.
- Straty ciepła do gruntu wyznaczono zgodnie z [96]. Pominięto dyfuzję wilgoci w przegrodach.
- Pominięto efekty brzegowe, związane ze skończonym wymiarem ścian i stropu, traktując je w obliczeniach jak nieskończone płyty.

Każda przegroda zbudowana jest z jednorodnych i izotropowych warstw. Umożliwia to badanie wpływu przegrody, złożonej z warstw o różnych materiałach, na warunki w pomieszczeniu.

Przyjęcie jednolitej temperatury w pomieszczeniu może podobnie, jak w modelu Li, Delsante, wynikać z założenia, że znajdują się w nim źródła ciepła rozproszone równomiernie na podłodze [59, 60, 78]. Źródła te, w postaci użytkowników i sprzętu elektrycznego, generują strugi konwekcyjne, które powodują wymie-

szanie powietrza w obiekcie i ustalanie się stałej temperatury. Ten sam charakter źródeł ciepła reprezentuje promieniowanie słoneczne, pozyskiwane przez pomieszczenie za pośrednictwem okien oraz ogrzewanie podłogowe. Jednolitą temperaturę w pomieszczeniu można także przyjąć przy założeniu, że powietrze traktuje się jako układ o parametrach skupionych. Oznacza to, że parametr fizyczny jest uśredniony i odniesiony do środka masy układu.

Dodatkowym źródłem ciepła, pozyskiwanym przez pomieszczenie, jest ciepło pochodzącego z promieniowania słonecznego. Jest ono przewodzone przez ściany i dach budynku. Dostarczane jest także do wnętrza obiektu za pośrednictwem okien. Proces ten powiększa również akumulację w przegrodach wewnętrznych oraz zwiększa moc wewnętrznych źródeł ciepła.

Uzyskane z symulacji numerycznej wyniki obliczeń przedstawiają dobowe przebiegi:

- temperatury wewnętrznej,
- temperatury w poszczególnych warstwach przegród nieprzezroczystych,
- strumieni objętości powietrza wentylacyjnego i liczby wymian,
- mocy grzewczej na ogrzanie powietrza wentylacyjnego,
- sumarycznej mocy grzewczej w sezonie zimowym na pokrycie strat wynikających z wentylacji i przenikania (źródło ciepła może pracować ze stałym wydatkiem mocy grzewczej lub regulowanym),
- całkowitej akumulacji ciepła w obiekcie,
- akumulacji w poszczególnych przegrodach,
- strat i zysków ciepła przez: ściany, strop i okna,
- strat ciepła do gruntu.

Matematyczny model, który wykorzystano w autorskim programie komputerowym, do symulowania nieustalonych procesów wymiany ciepła i powietrza w obiektach budowlanych, przedstawiony jest poniżej.

### 6.2.1. Wymiana ciepła

W związku z wykazanymi powyżej uproszczeniami, pole temperatury w ścianach i w stropie opisywane jest jednowymiarowym równaniem przewodnictwa:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6.5)$$

z nieustalonymi warunkami brzegowymi:

- po stronie wewnętrznej temperatura w pomieszczeniu jest parametrem skupionym, będącym wynikiem wszystkich omawianych oddziaływań energetycznych, oraz spełniony jest warunek brzegowy:

$$h_i \cdot [T_{sc1} - T_i] = -\lambda_1 \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_1 \quad (6.6)$$

gdzie indeks „1” oznacza pierwszą warstwę,

- dla przegrody wielowarstwowej warunek brzegowy na granicy warstw jest warunkiem IV rodzaju:

$$-\lambda_j \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_j = -\lambda_{j+1} \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{j+1} \quad (6.7)$$

- po stronie zewnętrznej zastosowano warunek brzegowy III rodzaju, z dodatkowym członem, uwzględniającym padający na ścianę i przez nią pochłaniany strumień promieniowania słonecznego. Zarówno strumień promieniowania, jak i temperatura otoczenia, są funkcjami czasu.

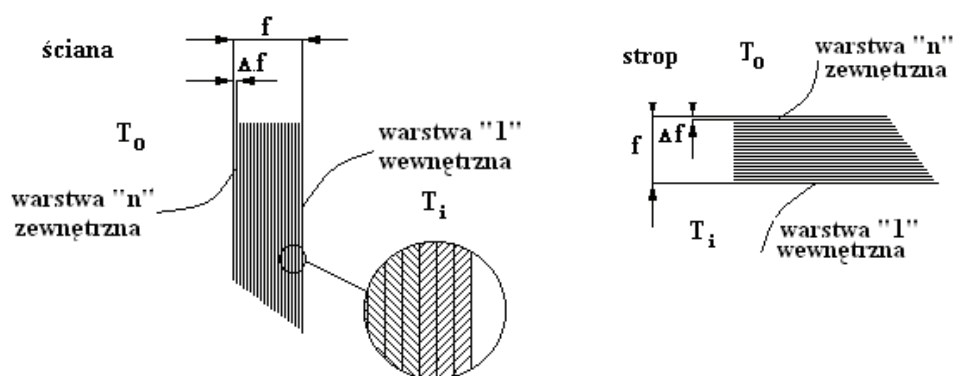
$$\alpha_s \cdot G_\beta - h_o \cdot [T_{scn} - T_o] = -\lambda_n \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_n \quad (6.8)$$

gdzie indeks „n” oznacza ostatnią, zewnętrzną warstwę.

Równanie przewodnictwa rozwiązywane było z warunkami początkowymi:

- temperatura wewnątrz wszystkich warstw przegród i stropu: 20°C,
- wartości wszystkich parametrów, zależnych od czasu, odpowiadały godzinie 0.

Obliczenia prowadzono dla prostych budynków, o kształcie prostopadłościanów – (rys. 6.9, 6.10). Dla potrzeb metody numerycznej ściany i strop były podzielone na 20 warstw, z których każda, w granicznym przypadku, mogła mieć inne własności cieplne – (rys. 6.2). W numerycznych obliczeniach pola temperatur, w ścianach zewnętrznych zastosowano standardową metodę różnic skończonych wyznaczając temperatury w środku każdej warstwy.



Rys. 6.2. Przekroje ścian i stropu

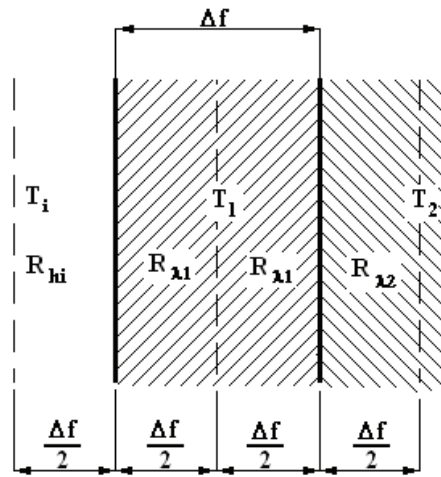
W praktyce, rozpatrywano ściany zbudowane maksymalnie z czterech różnych materiałów, o grubościach będących wielokrotnością grubości warstwy.

Krok czasowy dobierano w ten sposób, aby spełnione było kryterium stabilności von Neumanna:

$$\Delta\tau \leq 0,5 \cdot \frac{\rho_j \cdot c_{pj} \cdot \Delta f^2}{\lambda_j} \quad (6.9)$$

w którym wartości  $\rho_j$ ,  $c_{pj}$ ,  $\lambda_j$  były brane dla tej warstwy „j”, dla której współczynnik wyrównywania temperatur:  $a_j = \frac{\lambda_j}{\rho_j \cdot c_{pj}}$  był największy.

Rozkład oporów cieplnych w warstwie 1, tj. warstwie ograniczającej wnętrze pomieszczenia, przedstawiono na rys. 6.3:



Rys. 6.3. Warstwa wewnętrzna

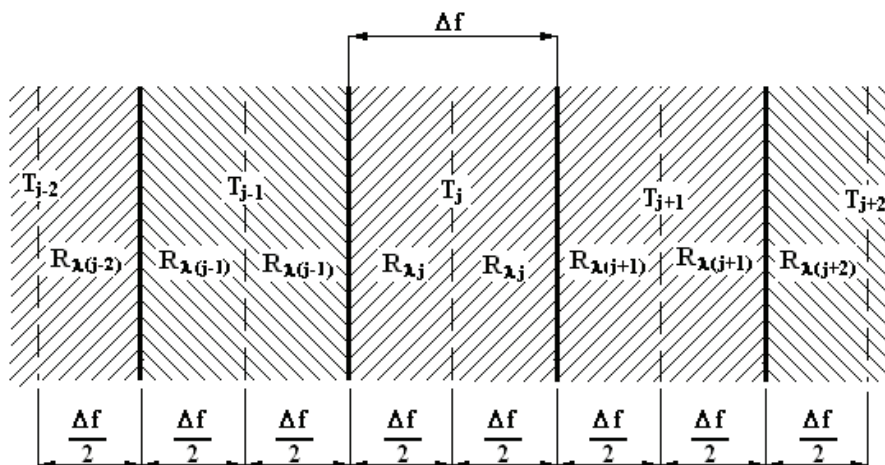
gdzie:  $R_{hi} = \frac{1}{h_i}$  jest oporem przyjmowania ciepła,

$R_{\lambda_j} = \frac{2 \cdot \lambda_j}{\Delta f}$  jest oporem przewodzenia ciepła dla połowy grubości warstwy,  
 $T_j$  temperatura w środku warstwy „j”

Dla tak przyjętego schematu temperatura w warstwie 1, po czasie  $\Delta\tau$ , wyniesie:

$$T_1' = T_1 + \frac{2 \cdot \Delta\tau}{\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta f^2} \left[ \frac{T_i - T_1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{2}{\Delta f \cdot h_i}} - \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}} \right] \quad (6.10)$$

Wewnątrz ściany rozkład oporów i temperatur przedstawia się zgodnie z rys. 6.4:

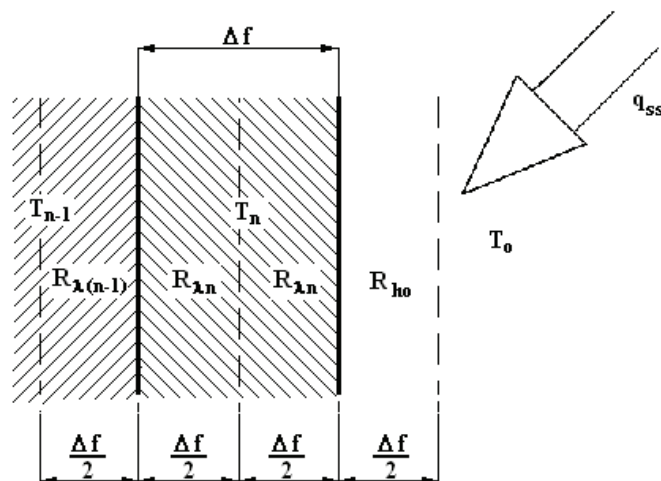


Rys. 6.4. Warstwy wewnętrzne

Temperatura po czasie  $\Delta\tau$  wyniesie:

$$T'_j = T_j + \frac{2 \cdot \Delta\tau}{\rho_j \cdot c_{pj} \cdot \Delta f^2} \left[ \frac{T_{j-1} - T_j}{\frac{1}{\lambda_{j-1}} + \frac{1}{\lambda_j}} - \frac{T_j - T_{j+1}}{\frac{1}{\lambda_j} + \frac{1}{\lambda_{j+1}}} \right] \quad (6.11)$$

Rozkład oporów cieplnych w warstwie n, tj. warstwie zewnętrznej przedstawiono na rysunku rys. 6.5.



Rys. 6.5. Warstwa zewnętrzna

Dla tak przyjętego schematu temperatura w warstwie „n”, po czasie  $\Delta\tau$ , wyniesie:

$$T'_n = T_n + \frac{2 \cdot \Delta\tau}{\rho_n \cdot c_{pn} \cdot \Delta f^2} \left[ \frac{T_{n-1} - T_n}{\frac{1}{\lambda_{n-1}} + \frac{1}{\lambda_n}} - \frac{T_n - T_0}{\frac{1}{\lambda_n} + \frac{2}{\Delta f \cdot h_o}} \right] + \frac{\Delta\tau \cdot q_{ss}}{\rho_n \cdot c_{pn} \cdot \Delta f} \quad (6.12)$$

gdzie:

$R_{ho} = \frac{1}{h_o}$  jest oporem przejmowania ciepła od strony zewnętrznej,

$R_{\lambda_j} = \frac{2 \cdot \lambda_j}{\Delta f}$  jest oporem przewodzenia ciepła dla połowy grubości warstwy,

$T_i$  – temperatura w środku warstwy „j”.

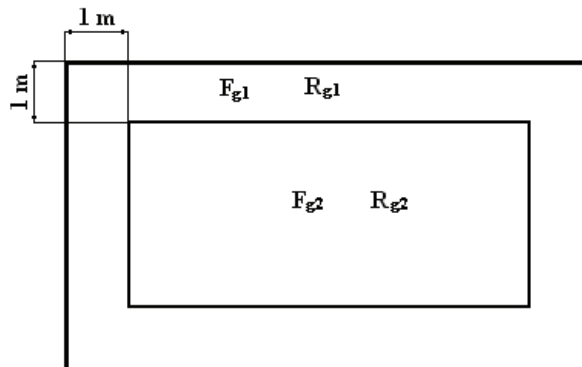
Gęstość strumienia ciepła, wymienianego na drodze przenikania przez okna wyznaczono następująco:

$$q_{ok} = U_{ok} \cdot (T_i - T_o) \quad (6.13)$$

Podłogę w pomieszczeniu na gruncie podzielono na dwie strefy. Do strefy I zaliczono pas podłogi o szerokości 1 m, wzdłuż ścian zewnętrznych, zakładając, że temperatura gruntu równa jest temperaturze zewnętrznej. Do strefy II należy pozostała część podłogi z temperaturą gruntu równą 8°C [9]. Sumaryczny strumień ciepła, przepływającego do gruntu, opisuje zależność:

$$Q_{gr} = F_{g1} \frac{T_i - T_o}{R_{g1}} + F_{g2} \frac{T_i - 8}{R_{g2}} \quad (6.14)$$

$F_{g1}$  i  $F_{g2}$  – powierzchnie I i II strefy, o oporach przewodzenia odpowiednio  $R_{g1}$  i  $R_{g2}$ .



Rys. 6.6. Rzut podłogi



### 6.2.2. Promieniowanie słoneczne

Obiekt zlokalizowany jest w terenie zabudowanym, stąd zakłada się, że jest on częściowo zacieniany przez okoliczne budynki. Założono, że promieniowanie bezpośrednie jest tłumione proporcjonalnie do cosinusa kąta zenitu, natomiast dla promieniowania dyfuzyjnego przyjęto średni współczynnik zacienienia 0,6. Odpowiada on uśrednionej wartości normowego współczynnika zacienienia budynku wzdłuż pionowej ściany. Przyjęto brak zacienienia dla powierzchni poziomych (stropodach budynku). Współczynnik refleksyjności podłoża przyjęto jako  $\rho_r = 0,2$ , a współczynnik korekcyjny dla promienia odbitego wynosi  $R_0 = 0,5$ . Dla tak przyjętych wartości współczynników wzór (3.1) dla ścian pionowych ( $\beta = 90^\circ$ ) przyjmuje postać:

$$G_\beta = G_b \cdot (\cos\theta_\beta + 0,1 \cdot \cos\theta_z) + 0,36 \cdot G_d \quad (6.15)$$

Gęstość strumienia ciepła absorbowanego przez ścianę, w wyniku promieniowania słonecznego  $q_s$ , na każdej z czterech ścian budynku, jest inna w związku z różną operacją słoneczną, związaną z orientacją ściany:

$$q_s = \alpha_s \cdot G_\beta \quad (6.16)$$

Przyjęto model pochłaniania promieniowania słonecznego przez przegrody wewnętrzne, jak dla kolektorów [93, 94]. Posłużono się w obliczeniach efektywnym współczynnikiem transmisyjno-absorpcyjnym  $\alpha_{\text{eff}}$ . Współczynnik ten definiuje stosunek energii, pochłoniętej przez pomieszczenie do całkowitej energii promieniowania słonecznego, docierającego do zewnętrznej powierzchni okna.

Promieniowanie słoneczne, padające na budynek częściowo jest absorbowane przez ściany zewnętrzne, a częściowo przenika do pomieszczeń poprzez okna. Efektywną, zastępczą absorbcyjność pomieszczeń, definiuje się jako stosunek promieniowania pochłoniętego wewnątrz pomieszczenia do całego promieniowania, dochodzącego doń poprzez okna. A to promieniowanie jest funkcją transmisyjności szyb okiennych.

Promieniowanie słoneczne, przechodzące przez okna, jest częściowo natychmiast absorbowane przez ściany wewnętrzne a częściowo przez nie odbijane. Promieniowanie odbite może przejść na zewnątrz. Jeżeli powierzchnia okien wynosi  $A_{\text{ok}}$ , zaś powierzchnia wewnętrznych ścian absorbujących równa jest  $A_a$ , to efektywny współczynnik transmisyjno-absorpcyjny powierzchni wewnętrznych określa się następującą, przybliżoną zależnością:

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{\alpha_{\text{sc}} \cdot \alpha_p}{\alpha_p + (1 - \alpha_p) \cdot \frac{A_{\text{ok}}}{A_a} \cdot \alpha_{\text{sd}}} \quad (6.17)$$

gdzie: całkowita transmisyjność okna dla promieniowania całkowitego i dyfuzyjnego wynosi odpowiednio  $\alpha_{sc}$  i  $\alpha_{sd}$ , absorpcyjność powierzchni przegród wewnętrznych uwzględniająca kąt padania promieniowania na powierzchnię  $\alpha_p$ :

$$\alpha_p = f_s \cdot \alpha_{so} \quad (6.18)$$

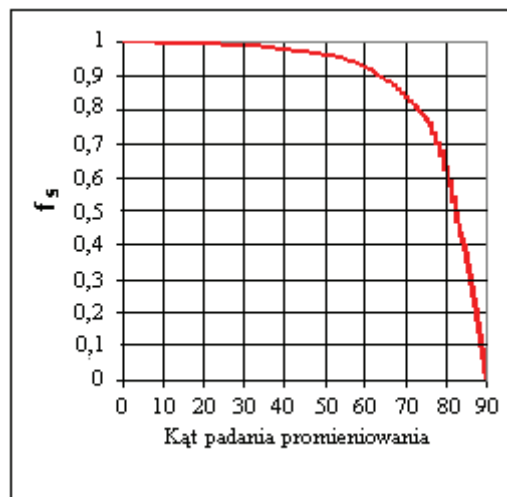
$\alpha_{so}$  to absorpcyjność powierzchni przy zerowym kącie padania promieniowania (liczonym od normalnej do powierzchni), a współczynnik  $f_s$  przedstawiono na rys. 6.7.

Metodykę uzyskiwania średnich miesięcznych strumienia promieniowania słonecznego, padającego na poszczególne przegrody, podano w rozdziale 3.

W programie krzywa ta (rys. 6.7), została aproksymowana odcinkami, według poniższego zapisu:

$$\begin{aligned} \theta \leq 30 & \quad f_s = -0,0033 \cdot \frac{\theta}{10} + 1 \\ 30 < \theta \leq 50 & \quad f_s = -0,005 \cdot \left(\frac{\theta}{10}\right)^2 + 0,025 \cdot \frac{\theta}{10} + 0,96 \\ 50 < \theta \leq 76 & \quad f_s = -0,03 \cdot \left(\frac{\theta}{10}\right)^2 + 0,3 \cdot \frac{\theta}{10} + 0,21 \\ \theta > 76 & \quad f_s = -0,21 \cdot \left(\frac{\theta}{10}\right)^2 + 2,94 \cdot \frac{\theta}{10} - 9,45 \end{aligned}$$

gdzie  $\theta$  jest kątem padania.



Rys. 6.7. Kątowa zależność absorpcyjności powierzchni pochłaniającej  $f_s$ .

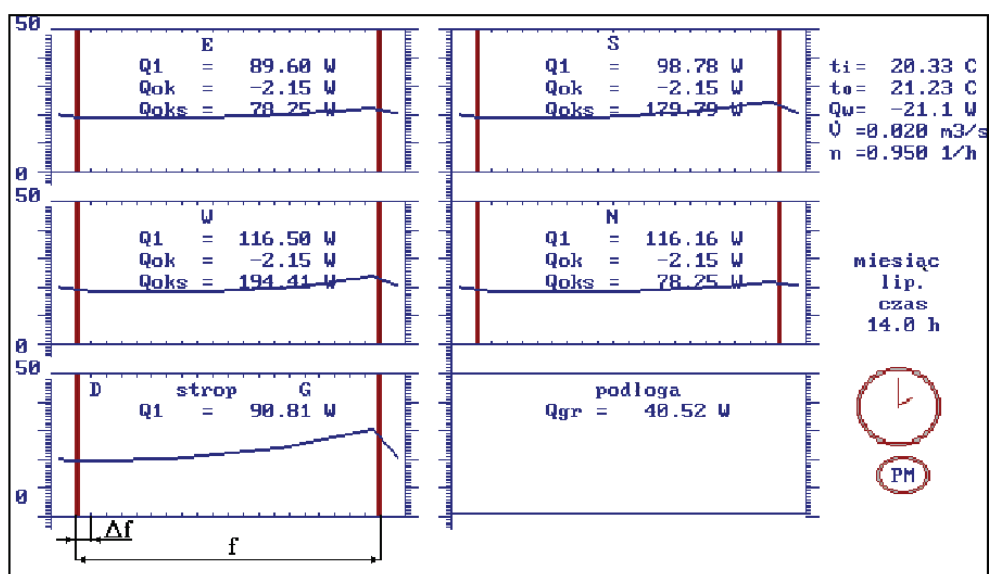
### 6.2.3. Wymiana powietrza wentylacyjnego

Założono, że naturalna wymiana powietrza jest procesem wymuszonym różnicą gęstości powietrza, która wynika z różnicy temperatur na zewnątrz i wewnątrz budynku oraz ciśnieniem, wywołanym oddziaływaniem wiatru. Proces ten definiuje zależność (5.13) w budynku jednostrefowym, a (5.45) w budynku dwustrefowym.

### 6.3. Metodyka obliczeń numerycznych

Model numeryczny zezwala na wprowadzenie do 20 warstw wykonanych z różnych materiałów, z których zbudowane są ściany zewnętrzne i strop. Program umożliwia wizualizację przebiegu temperatury w warstwach ścian i stropu budynku. Jednocześnie, także w czasie rzeczywistym, w którym przebiega proces, wyświetlane są na wykresach przedstawiających przebieg temperatury wewnątrz każdej z czterech ścian budynku, chwilowe wartości parametrów procesu.

Przykładowy przebieg wizualizacji obliczeń przedstawia rys. 6.8. Obliczenia wykonywane są w lipcu o godzinie 14<sup>00</sup>, w budynku nr 1 – tablica 6.1.



Rys. 6.8. Wizualizacja przebiegów parametrów symulowanych przy pomocy programu komputerowego

gdzie:

- $Q_1$  – strumień ciepła, wymieniany pomiędzy przegrodą a powietrzem wewnątrz pomieszczenia,
- $Q_{ok}$  – strumień ciepła, przenikający przez okno – znak „-”, oznacza, że strumień skierowany, jest do wnętrza budynku,
- $Q_{oks}$  – strumień ciepła, związany z promieniowaniem słonecznym przenikający przez okna i pochłaniany wewnątrz pomieszczenia.

Ponadto wyświetlane są wartości:

- temperatury zewnętrznej i wewnętrznej –  $t_i, t_o$ ,
- strumienia ciepła, przekazywanego przez strumień powietrza wentylacyjnego –  $Q_w$ ,
- strumienia powietrza wentylacyjnego –  $\dot{V}$ ,
- liczby wymian powietrza wentylacyjnego –  $n$ .

Obliczenia prowadzić można w dowolnym miesiącu, przy czym po przejściu liczby dni, równej ich liczbie w danym miesiącu, następuje automatyczna zmiana na kolejny miesiąc. Wartością startową, dla każdej kolejnej iteracji, jest chwilowa wartość temperatury zewnętrznej. Równanie przewodnictwa rozwiązywane jest metodą różnic skończonych dla kolejnych warstw wszystkich ścian i stropu (z uwzględnieniem lub bez padającego na warstwy zewnętrzne bezpośredniego promieniowania słonecznego). Wartości temperatury w warstwach pierwszych (tj. kontaktujących się z wnętrzem pomieszczenia) pozwala na wyliczenie strumienia ciepła, przepływającego od pomieszczenia do ścian. Równoległe wyliczane są straty ciepła przez okna i do gruntu oraz strumień ciepła wpływający przez okna, dzięki oddziaływaniu słonecznemu. Wyznaczenie tych wszystkich strumieni ciepła pozwala na napisanie bilansu energetycznego pomieszczenia, z uwzględnieniem entalpii wpływającego strumienia powietrza wentylacyjnego. Z bilansu obliczana jest „nowa” temperatura wewnętrzna i proces iteracyjny jest powtarzany.

Z termodynamicznego punktu widzenia, budynek przedstawia układ otwarty w stanie nieustalonym. Czynnikiem termodynamicznym jest powietrze wentylacyjne – wpływające do układu przy temperaturze powietrza zewnętrznego i opuszczające go przy temperaturze powietrza wewnętrznego. Układ ten ograniczony jest czterema pionowymi ścianami, stropem i podłożem. Bilans energetyczny takiego układu otwartego opisuje następująca formuła:

$$\Delta E = (Q + I_{wl} - I_{wy}) \cdot \tau \quad (6.19)$$

w której  $\Delta E = E' - E$  przedstawia zmianę energii wewnętrznej czynnika, obliczaną w kolejnych krokach czasowych  $\tau$ . Powietrze traktowane jest jako gaz doskonały i stąd:

$$\Delta E = V \cdot \rho \cdot c_v \cdot (T_i' - T_i) \quad (6.20)$$

gdzie:  $V$  jest objętością powietrza wewnątrz budynku, a  $T'$  i  $T$  to temperatury powietrza w pomieszczeniu, w kolejnych krokach czasowych.

$Q$  jest algebraiczną sumą strumieni ciepła, wymienianych z otoczeniem i strumieni ciepła, doprowadzanego do czynnika wewnątrz budynku i wynosi:

$$Q = Q_{zr} + \sum_j (Q_{oks_j} - Q_{ok_j}) - \sum_i Q_{1_i} - Q_{ak} - Q_{gr} \quad (6.21)$$

gdzie: indeks „i” opisuje kolejne przegrody zewnętrzne, natomiast indeks „j” odpowiada przegrodom zewnętrznym posiadającym okna.

- $Q_{\text{zr}}$  – strumień ciepła, wydzielanego przez źródła ciepła w pomieszczeniach budynku. Źródłami tymi mogą być zarówno urządzenia grzewcze i elektryczne, jak również przebywający wewnątrz ludzie.  
 $Q_{\text{ok}_j}$  – strumień ciepła, przenikający przez okno w ścianie „j”.  
 $Q_{\text{oks}_j}$  – strumień ciepła, związany z promieniowaniem słonecznym, przenikający przez okna w ścianie „j” i pochłaniany wewnątrz pomieszczenia.  
 $Q_{1_i}$  – strumień ciepła, wymieniany pomiędzy przegrodą „i” a powietrzem wewnątrz pomieszczenia.  
 $Q_{\text{ak}}$  – strumień ciepła, wymieniany pomiędzy przegrodami wewnętrznymi a powietrzem.  
 $I_{\text{wl}}, I_{\text{wy}}$  – entalpia strumienia powietrza wentylacyjnego, wlotowego i wylotowego.

Zakłada się równość natężenia przepływu powietrza na wlocie i wylocie z układu w danej chwili. Temperatura powietrza na wlocie równa jest chwilowej temperaturze zewnętrznej, a na wylocie temperaturze wewnątrz układu:

$$I_{\text{wl}} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_o; \quad I_{\text{wy}} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_i; \quad (6.22)$$

Wyrażenie:

$$Q_w = I_{\text{wy}} - I_{\text{wl}} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_i - T_o) \quad (6.23)$$

stanowi strumień ciepła, przekazywany przez strumień powietrza wentylacyjnego do powietrza w pomieszczeniu.

Wykorzystując równanie bilansu energetycznego (6.21) wraz z (6.19), (6.20) i (6.23) otrzymuje się wyrażenie na temperaturę w pomieszczeniu, w kolejnym kroku czasowym:

$$T_i' = T_i + \frac{(Q - Q_w)\tau}{\rho \cdot c_v \cdot V} \quad (6.24)$$

Przyjęta maksymalna długość kroku czasowego, dla którego otrzymuje się stabilne rozwiązania, została wyznaczona ze wspomnianego wyżej kryterium stabilności von Neumanna. Dla większości obliczanych przypadków ten krok czasowy wynosił 100 s, tj. dla budynków nr: 1, 3, 5. W budynku nr 2 i 4 utrzymanie stabilności rozwiązania wymagało obniżenia kroku do 10 s – tablica 6.1.

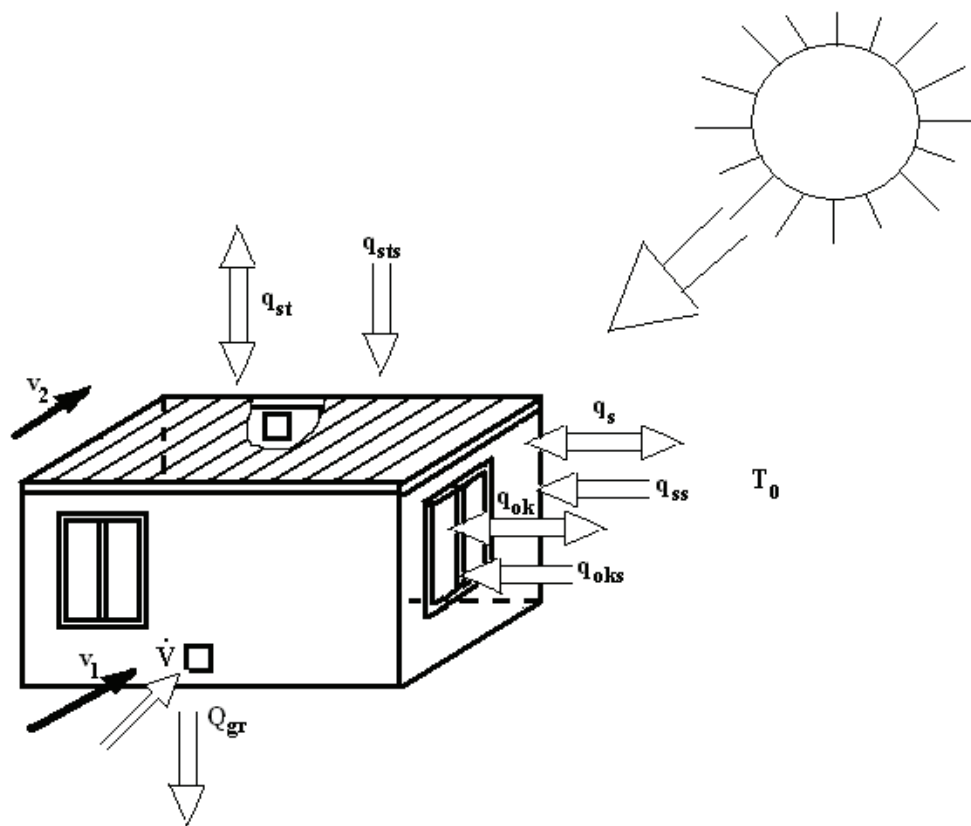
Dane dotyczące kolejnych warstw, tj. gęstości ich materiału, ciepła właściwego i współczynnika przewodności cieplnej, przygotowywane są w oddzielnych plikach.

Wszystkie przedstawione powyżej elementy bilansu cieplnego budynku, pozwalają na wyznaczenie chwilowego natężenia przepływu powietrza wentylacyjnego.

#### 6. 4. Charakterystyka analizowanych budynków

Do budynków jednostrefowych zalicza się budynki nie tylko jednoprzestrzenne, ale także domy jednorodzinne i niewielkie budynki mieszkalne. Obiekty dwustrefowe składają się z dwóch stref, lokowanych na dwóch poziomach. Każda ze stref może być zdefiniowana jako budynek jednostrefowy. Przepływ powietrza wentylacyjnego pomiędzy strefami odbywa się poprzez otwór w stropie, usytuowany pomiędzy piętrami.

Rozpatrzone zostały budynki: jedno- i dwustrefowy przedstawione na rys. 6.9 i rys. 6.10.

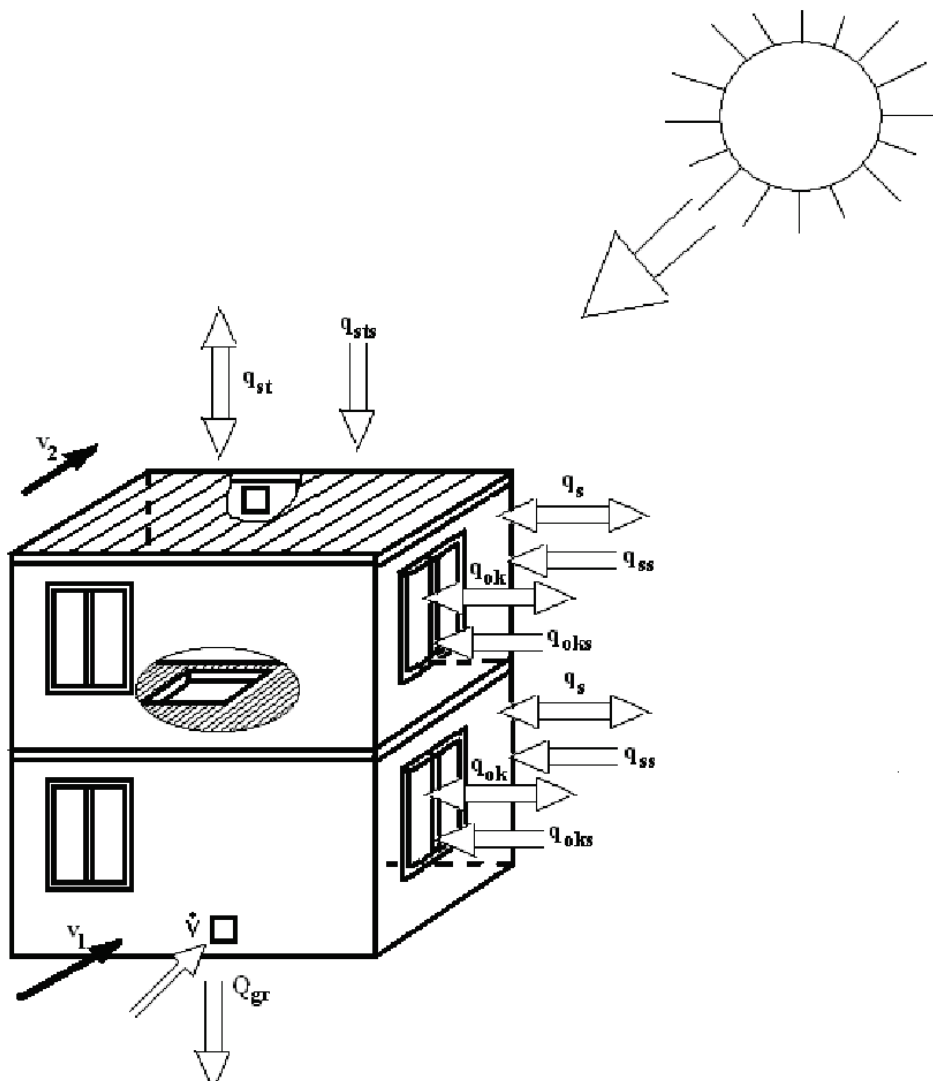


Rys. 6.9. Widok budynku jednostrefowego

gdzie:

- $q_{ss}$  – gęstość strumienia ciepła, absorbowanego przez ścianę w wyniku promieniowania słonecznego,
- $q_{sts}$  – gęstość strumienia ciepła, absorbowanego przez stropodach w wyniku promieniowania słonecznego,
- $q_s$  – gęstość strumienia ciepła, wymienianego pomiędzy ścianą a otoczeniem na drodze konwekcji i promieniowania,

- $q_{st}$  – gęstość strumienia ciepła, wymianianego pomiędzy stropodachem a otoczeniem na drodze konwekcji i promieniowania,
- $q_{ok}$  – gęstość strumienia ciepła, wymianianego pomiędzy wnętrzem pomieszczenia a otoczeniem poprzez okno,
- $q_{oks}$  – gęstość strumienia ciepła, wnikającego przez okna, w wyniku promieniowania słonecznego,
- $Q_{gr}$  – strumień ciepła przepływającego do gruntu,
- $\dot{V}$  – strumień powietrza wentylacyjnego.



Rys. 6.10. Widok budynku dwustrefowego

Analizowane procesy ciepło-przepływowe dotyczą pięciu budynków jedno i dwustrefowych, o różnej pojemności przegród zewnętrznych. Ich dane wymiarowe, współczynniki cieplne, pojemności cieplne, dane materiałowe przegród budowlanych, zawierają tablice 6.1–6.3, a wyniki obliczeń numerycznych dotyczące dynamiki omawianych procesów przedstawiono w rozdziale 7, który składa się z trzech podrozdziałów.

Punkt 7.1 zawiera wyniki symulacji w budynkach nr 1 i nr 2 – (tablica 6.1), w których pomija się wpływ wiatru na wentylację w kształtowaniu procesów przepływowych. Powyższe warunki przyjęto do obliczeń procesów jedynie w dwóch budynkach jednostrefowych o skrajnej pojemności cieplnej przegród zewnętrznych. Pozostałe symulacje, których wyniki przedstawiono w 7.2 i 7.3 dotyczą budynków zarówno jednostrefowych jak i dwustrefowych, wykonano z wymuszeniem pochodzącym także od wiatru.

Tablica 6.1. Dane wymiarowe i cieplne badanych obiektów budowlanych

| nr bud.  | gr. ściany<br>cm                      | gr. izola. ściany<br>cm | gr. stropu<br>cm | gr. izola. stropodachu<br>cm | R <sub>śc</sub> ściany<br>m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> | R <sub>ST</sub> stropodachu<br>m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> | pojem. cieplna bud. jedstr.<br>kJ·K <sup>-1</sup> | pojem. cieplna bud. dwustr.<br>kJ·K <sup>-1</sup> |
|--|---------------------------------------|-------------------------|------------------|------------------------------|---|--|---|---|
| 1  | 80                                    | –                       | 40               | –                            | 1,19  | 0,684  | 10281   | 21696   |
| 2  | 30                                    | 27                      | 30               | 27                           | 4,33  | 4,762  | 2486  | 5859  |
| 3  | 38                                    | –                       | 20               | 4                            | 0,664   | 1,144  | 4838  | 9790  |
| 4  | 48                                    | 10                      | 20               | 20                           | 2,645   | 4,695  | 4913  | 9940  |
| 5  | 40                                    | –                       | 20               | 10                           | 2,480   | 1,590  | 3133  | 6355  |
| nr bud.  | rodzaj budynku jedno- i dwustrefowego |                         |                  |                              | nr bud.   | rodzaj budynku jedno- i dwustrefowego                            |   |   |
| 1  | murowany ciężki                       |                         |                  |                              | 4   | murowany, izolowany cieplnie                                     |   |   |
| 2  | konstrukcji szkieletowej lekki        |                         |                  |                              | 5   | drewniany  |   |   |
| 3  | murowany, nie izolowany cieplnie      |                         |                  |                              | –   | –  |   |   |
| opór warstwy podłogi we wszystkich budynkach – m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> |                                       |                         |                  |                              |   |  |   |   |
| strefa pierwsza  |                                       |                         |                  |                              | strefa druga  |  |   |   |
| 2,20   |                                       |                         |                  |                              | 2,36  |  |   |   |
| współczynnik przejmowania ciepła – W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>            |                                       |                         |                  |                              |   |  |   |   |
| ściany pionowe   |                                       |                         |                  |                              | ściany poziome  |  |   |   |
| h <sub>i</sub> = 8, h <sub>o</sub> = 25  |                                       |                         |                  |                              | h <sub>i</sub> = 10, h <sub>o</sub> = 25                    |  |   |   |



Pojemność cieplna wewnętrznej masy akumulacyjnej jest we wszystkich analizowanych budynkach jednakowa i wynosi  $1134 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Maksymalny wydatek mocy grzewczej w styczniu dla budynków jednostrefowych, według kolejności podanej w tabelicy 6.1, wynosi: 3100 W, 1400 W, 3500 W, 1700 W, 2000 W.

Okna posiadają współczynnik przenikania ciepła  $U_{ok} = 1,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Tabela 6.2. Dane materiałowe przegród badanych obiektów budowlanych

| materiał          | $\lambda$<br>$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | $\rho$<br>$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | $c_p$<br>$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
|-------------------|---|---|--|
| cegła             | 0,77  | 1800                                    | 840  |
| drewno            | 0,17  | 550                                     | 2150   |
| styropian         | 0,045   | 30                                      | 1460   |
| wełna mineralna   | 0,045   | 130                                     | 750  |
| glina z trocinami | 0,41  | 800                                     | 1260   |

Tabela 6.3. Powierzchnie i orientacje przegród i okien

| orientacja   | N   | E   | S   | W   |
|--|-----|-----|-----|-----|
| <b>budynek jednostrefowy</b>   |     |     |     |     |
| pow. przegrody, $\text{m}^2$   | 15  | 15  | 15  | 15  |
| <b>wymuszenie bez udziału wiatru – 7.1.</b>                          |     |     |     |     |
| pow. okna, $\text{m}^2$  | 9   | 4,5 | 7,5 | 1,5 |
| udział ok. w ścianie   | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,1 |
| <b>wymuszenie z udziałem wiatru – 7.2.</b>                           |     |     |     |     |
| pow. okna, $\text{m}^2$  | –   | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| <b>budynek dwustrefowy – 7.3.</b>                                    |     |     |     |     |
| pow. przegrody w I strefie, $\text{m}^2$                             | 15  | 15  | 15  | 15  |
| pow. okna w I strefie, $\text{m}^2$                                  | –   | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| pow. przegrody w II strefie, $\text{m}^2$                            | 15  | 15  | 15  | 15  |
| pow. okna w II strefie, $\text{m}^2$                                 | –   | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| powierzchnia:  |     |     |     |     |
| stropodachu w obu budynkach – $25 \text{ m}^2$                       |     |     |     |     |
| stropu pomiędzy piętrami, wewnętrznego – $25 \text{ m}^2$ .          |     |     |     |     |
| otworu w stropie wewnętrznym budynku dwustrefowego – $2 \text{ m}^2$ |     |     |     |     |

Poza słonecznymi zyskami energetycznymi, pozyskiwanymi przez ściany i okna występują stałe zyski energetyczne, pochodzące od ludzi i urządzeń. W obliczeniach przyjęto następujące ich wartości:

- 100 W – w punkcie 7.1. – budynek jednostrefowy, pozbawiony działania wiatru,
- 300 W – w punkcie 7.2. – budynek jednostrefowy, poddany działaniu wiatru,
- 600 W – w punkcie 7.3. – budynek dwustrefowy, poddany działaniu wiatru; po 300 W w każdej ze stref.

Zyski od ludzi wynoszą 50–60 W/osobę [9]. Symulacje numeryczne procesów ciepło-przepływowych we wszystkich typach budynków jedno i dwustrefowych prowadzono przy wartościach parametrów klimatu przedstawionych w tablicach 6.4–6.6. Wykorzystana w obliczeniach składowa normalna prędkości wiatru odnosi się do wiatrów, które napływają na ścianę o orientacji północnej, z przedziału azymutów 270°–360° i 0°–90° lub wiatrów o składowej normalnej, przeciwnie skierowanej, tj. napływających na ścianę o orientacji południowej, a więc wiatrów z przedziału azymutów 90°–270°. Wiatr napływający na ścianę północną, w której znajduje się dolny otwór wentylacyjny, pełni rolę wspomagającą przepływ powietrza przez budynek. Natomiast wiatr, oddziaływujący na ścianę południową, w której znajduje się górny otwór wentylacyjny, tłumia przepływ powietrza, lub po pokonaniu spadku ciśnienia generowanego różnicą gęstości - zmienia kierunek przepływu powietrza na przeciwny.

Tablica 6.4. Temperatura otoczenia

|                 | wartość<br>średnia<br>°C | amplituda<br>°C | przesunięcie<br>fazowe<br>h |
|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------------------|
| <b>maj</b>      | 13,44                    | 4,31            | – 8,26                      |
| <b>lipiec</b>   | 17,27                    | 4,04            | – 8,42                      |
| <b>wrzesień</b> | 13,08                    | 4,42            | – 8,24                      |

Wybór napływu kierunku wiatru na budynek, w przypadku wentylacji naturalnej, nie jest przypadkowy. Otwory wentylacyjne dopływowe lokowane są zawsze w północnej ścianie obiektu, aby w okresie letnim, przy wysokich sumach promieniowania słonecznego, uniknąć wpływu promieniowania słonecznego. Czasowy wzrost temperatury zewnętrznej może przekroczyć wartość temperatury wewnętrznej, powodując tym samym zaburzenia w przepływie powietrza przez budynek. Natomiast każda, nawet nieznaczna, zmiana kierunku wiatru na sąsiedni, przy otworze północnym, zmieni jego wpływ na ilość wymienianego powietrza, z racji niższych wartości składowych normalnych. Przy otworze południowym niższa składowa normalna wiatru sąsiedniego wpłynie na mniejsze tłumienie przepływu powietrza. Stąd też dokonana selekcja prędkości wiatru, przy przyjętej chropowato-

ści terenu i uśrednionych dla miesięcy wartościach pozostałych parametrów pogody w lecie, skutkuje, przy przyjętych założeniach, najintensywniejszą wymianą powietrza w analizowanych budynkach przy wietrze wspomagającym i przeciwnym z przepływem ku dołowi. Wiatr tłumiący wywołuje najslabszy przepływ.

Tablica 6.5. Prędkość wiatru

| <b>wiatr północny – wspomagający</b> |                               |                       | <b>wiatr południowy – przeciwny</b> |                               |                       |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| w. średnia<br>$m \cdot s^{-1}$       | amplituda<br>$m \cdot s^{-1}$ | przes.<br>fazowe<br>h | w. średnia<br>$m \cdot s^{-1}$      | amplituda<br>$m \cdot s^{-1}$ | przes.<br>fazowe<br>h |
| <b>maj – 10m</b>                     |                               |                       | <b>maj – 10m</b>                    |                               |                       |
| 2,381                                | 0,461                         | – 8,25                | 1,967                               | 0,739                         | – 7,25                |
| <b>maj – 1m</b>                      |                               |                       | <b>maj – 4m</b>                     |                               |                       |
| 1,105                                | 0,186                         | – 8,25                | 1,427                               | 0,536                         | – 7,25                |
| –                                    |                               |                       | <b>maj – 7m</b>                     |                               |                       |
| –                                    |                               |                       | 1,736                               | 0,65                          | – 7,25                |
| <b>lipiec – 10m</b>                  |                               |                       | <b>lipiec – 10m</b>                 |                               |                       |
| 2,298                                | 0,551                         | – 9,5                 | 1,759                               | 0,417                         | – 7,25                |
| <b>lipiec – 1m</b>                   |                               |                       | <b>lipiec – 4m</b>                  |                               |                       |
| 1,026                                | 0,246                         | – 9,5                 | 1,274                               | 0,302                         | – 7,00                |
| –                                    |                               |                       | <b>lipiec – 7m</b>                  |                               |                       |
| –                                    |                               |                       | 1,552                               | 0,368                         | – 7,00                |
| <b>wrzesień – 10m</b>                |                               |                       | <b>wrzesień – 10m</b>               |                               |                       |
| 1,886                                | 0,404                         | – 8,25                | 1,971                               | 0,505                         | – 8,00                |
| <b>wrzesień – 1m</b>                 |                               |                       | <b>wrzesień – 4m</b>                |                               |                       |
| 0,842                                | 0,18                          | – 8,25                | 1,431                               | 0,336                         | – 8,00                |
| –                                    |                               |                       | <b>wrzesień – 7m</b>                |                               |                       |
| –                                    |                               |                       | 1,740                               | 0,446                         | – 8,00                |

Prędkość wiatru na wysokości:

10 m – stacja meteorologiczna,

1 m ( $v_1$ ) – dolnego otworu wentylacyjnego,

4 m ( $v_2$ ) – górnego otworu wentylacyjnego w budynku jednostrefowym,

7 m ( $v_2$ ) – górnego otworu wentylacyjnego w budynku dwustrefowym.

Przyjęto współczynnik chropowatości  $N = 0,35$  – jak dla terenu zabudowanego – (rozdział 3).

Tablica 6.6. Sumy dobowe całkowitego promieniowania słonecznego na przegrody budynku [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}/\text{dobe}$ ].

| orientacja przegrody | N     | E     | S     | W     | stropo dach | $f_p$ |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|
| <b>maj</b>           | 3,574 | 5,581 | 6,861 | 5,831 | 16,821      | 0,56  |
| <b>lipiec</b>        | 3,884 | 5,544 | 6,302 | 6,702 | 16,977      | 0,58  |
| <b>wrzesień</b>      | 2,103 | 3,051 | 4,788 | 3,221 | 9,856       | 0,62  |

$f_p$  – udział promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym. Przegrody pionowe zacienione, poziome bez zacienienia, uwzględnione promieniowanie odbite od gruntu przy  $\rho_r = 0,2$ .

W dodatku 6.1 podano, dla porównania, sumy dobowe promieniowania liczone przy innych założeniach.

Podstawową powierzchnię otworu wentylacyjnego dobrano tak, by przy przyjętej dla stycznia temperaturze zewnętrznej, równej jej wartości średniej i temperaturze wewnętrznej równej  $20^\circ\text{C}$ , wymiana powietrza wentylacyjnego wynosiła jedną wymianę na godzinę.

W lipcu, w zależności od struktury materiałowej obiektu, a w konsekwencji od wartości temperatury wewnętrznej, istnieje w programie opcja skokowej regulacji powierzchni otworów wentylacyjnych, w celu uzyskania akceptowanej bądź tolerowanej przez mieszkańca temperatury w pomieszczeniu.

Wyniki obliczeń przedstawiono głównie w formie graficznej, bo tylko w tej postaci możliwa jest analiza dynamiki symulowanych parametrów. Przedstawione wyniki obliczeń opatrzone są symbolem, który określa udział poszczególnych parametrów klimatycznych w kształtowaniu procesów ciepłno-przepływowych, w badanych obiektach budowlanych. Brak oddziaływania parametru oznaczony jest „0”.

Poniższe litery oznaczają udział:

s – całkowitego promieniowania słonecznego,

w – wiatru gradientowego, zarówno wspomagającego jak i przeciwnego,

t – waporu termicznego,

a przedstawione poniżej symbole oznaczają wspólne oddziaływanie tych parametrów:

swt całkowitego promieniowania słonecznego, wiatru i różnicy temperatur,

0wt brak bezpośredniego promieniowania słonecznego (obecne jest dyfuzyjne), występuje wiatr oraz różnica temperatur,

00t brak bezpośredniego promieniowania słonecznego (obecne jest dyfuzyjne) oraz brak wiatru, występuje różnica temperatur.

Symbol swt i 0wt ze znakiem „+” oznacza udział wiatru wspomagającego, a ze znakiem „-” wiatru przeciwnego. Znak minus oznacza w tym wypadku jedynie przeciwny kierunek napływu wiatru.

Wykresy, które dotyczą dobowych przebiegów temperatur w warstwach przegród, opisane są następującymi symbolami:

- $t_1$  – temperatura pierwszej, wewnętrznej warstwy stropodachu lub ściany,
- $t_{11}$  – temperatura w środkowej warstwie stropodachu lub ściany,
- $t_{20}$  – temperatura w ostatniej, zewnętrznej warstwie stropodachu lub ściany,
- $t_i$  – temperatura wewnętrzna,
- $t_o$  – temperatura zewnętrzna.

Cykl obliczeniowy symulacji numerycznych prowadzony jest dla poszczególnych miesięcy. Wyniki obliczeń drukowane są w odstępach godzinnych, a więc dla 744 godzin w miesiącu, ale wykresy obejmują głównie wydruki z przedziału 679-tej – 740-tej godziny, tj. wydruki 2,5 dobowe (61 godzin). Taki wybór przedziału pozwala na uzyskiwanie rozwiązań pozbawionych wpływu warunków początkowych.



## 7. Nieustalony przepływ ciepła i powietrza w obiektach jedno- i dwustrefowych z naturalną wentylacją – o różnej strukturze materiałowej przegród

### 7.1. Nieustalony przepływ ciepła i powietrza w obiektach jednostrefowych, z pominięciem oddziaływania wiatru

Prezentowane, w bieżącym rozdziale, przebiegi temperatury wewnętrznej oraz strumienia objętości powietrza wentylacyjnego, w budynku jednostrefowym – (rys. 6.9), kształtowane były przez wymuszenie zewnętrzne z udziałem temperatury otoczenia oraz promieniowania słonecznego. Pominięto wpływ wiatru, zakładając, że otwory wentylacyjne chronione są przed jego bezpośrednim wpływem. W związku z tym, równanie (5.13), opisujące strumień objętości powietrza wentylacyjnego, pozbawione jest członu reprezentującego ciśnienie dynamiczne.

Budynki nr 1 i nr 2 – (tablica 6.1) są obiektami o skrajnej pojemności cieplnej przegród zewnętrznych. Przegrody pokryte są jednakowym tynkiem gładkim. Wewnętrzna masa, akumulująca ciepło, jest w obu budynkach identyczna. Okna, o różnej powierzchni, występują w każdej przegrodzie budynków – (tablica 6.3).

Symulacje numeryczne procesów cieplno-przepływowych przeprowadzono nie tylko z uwagi na różną strukturę materiałową przegród zewnętrznych ale także z uwagi na oddziaływanie energii słonecznej, pozyskiwanej za pośrednictwem okien. Stąd też, w kolejnych cyklach symulacji, wypunktowanych poniżej, uwzględnia się okna o różnej powierzchni oraz orientacji geograficznej, a więc o różnym stopniu pozyskiwania przez pomieszczenie energii słonecznej. Badań tych nie prowadzono w celu uzyskania informacji, które mogłyby prowadzić do zautomatyzowania procesu ustalania powierzchni otworów wentylacyjnych. Wiadomo bowiem z doświadczenia, że użytkownicy systemów hybrydowych preferują ręczną ich regulację, jako bardziej adekwatną do oczekiwań odbiorców. Celem badań nie było także wyznaczenie ścisłych relacji pomiędzy wartościami otrzymanymi dla wybranych wariantów obliczeń, a wskazanie różnic w komforcie użytkowanych, w tych samych warunkach klimatycznych, budynków. Stąd w zależności od struktury materiałowej obiektu i słonecznych zysków energetycznych, pozyskiwanych za pośrednictwem okien, a w konsekwencji od wartości temperatury wewnętrznej, powierzchnia otworu zwielokrotniana jest tak, by uzyskać akceptowaną – bądź tolerowaną przez mieszkańców – temperaturę w pomieszczeniu. Przyjętą w kolejnych obliczeniach powierzchnię otworów wentylacyjnych, w zależności od ustalonej powierzchni i orientacji okien, zamieszczono w tablicy 7.1.1, a powierzchnie okien podano w tablicy 6.3. Poza zyskami energetycznymi, pozyskiwanymi z promieniowania słonecznego przez ściany i za pośrednictwem okien, występują stałe 100 W zyski energetyczne od ludzi i urządzeń.

Wykonano następujące cykle symulacyjne w dwóch opcjach, z udziałem całkowitego promieniowania słonecznego – (s0t) i rozproszonego – (00t):

- 1) brak okien i otworów wentylacyjnych,
- 2) brak okien,
- 3) istnieje jedno okno w przegrodzie wschodniej,
- 4) istnieją dwa okna w przegrodach wschodniej i zachodniej,
- 5) istnieje jedno okno w przegrodzie południowej,
- 6) istnieją trzy okna w przegrodach: wschodniej, zachodniej oraz północnej,
- 7) istnieje jedno okno w przegrodzie północnej,
- 8) istnieją cztery okna w przegrodzie: północnej, wschodniej, zachodniej oraz południowej.

Powyższe cykle symulacyjne przeprowadzano zarówno z udziałem wewnętrznej masy akumulacyjnej, jak i bez jej udziału.

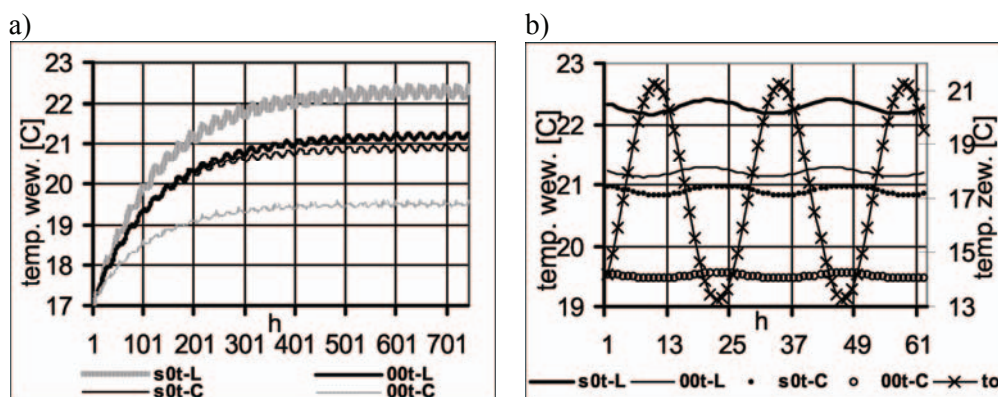
Tylko w cyklu obliczeniowym, z punktu 2, oba budynki mają podstawową powierzchnię otworów wentylacyjnych. W pozostałych cyklach, z punktów 3–8, przyjęto różną powierzchnię otworów wentylacyjnych dla budynku ciężkiego i dla lekkiego, w celu osiągnięcia zbliżonej temperatury w ich wnętrzach.

Legendy, zamieszczone poniżej wykresów, opatrzone są następującymi literami, które wskazują na strukturę materiałową budynku:

- zbudowany z cegły tzw. ciężki – „C”,
- konstrukcji szkieletowej, izolowany wełną mineralną, tzw. lekki – „L”,

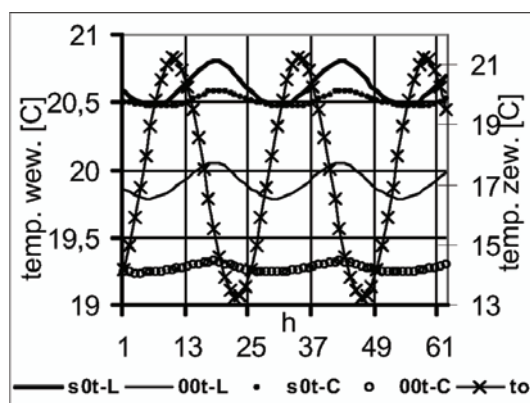
Celem uwypuklenia reakcji struktury materiałowej przegród budynku na wymuszenia zewnętrzne i wewnętrzne, przeprowadzono cykl obliczeń nr 1, w którym budynki pozbawione są okien i otworów wentylacyjnych, a wymiana ciepła zachodzi jedynie przez przegrody zewnętrzne. Rysunek 7.1.1a pokazuje proces ustalania, w ciągu całego miesiąca, temperatury wewnętrznej w badanych obiektach, a rys. 7.1.1b przedstawia jej dobowe wahania. Wykresy z rys. 7.1.1a wykazują jakościowe różnice w przebiegach temperatur wewnętrznych. Różnice te wynikają z pojemności cieplnej ścian, a więc ich struktury materiałowej. Ściany, wykonane z materiałów o dużej gęstości, pełnią w procesie wymiany ciepła rolę regulatora i bufora ciepła. W budynku lekkim działanie tego procesu jest zminimalizowane i dlatego wahania temperatury w tym obiekcie są dwukrotnie wyższe. Stąd też dobowe przebiegi temperatury w budynku lekkim, przy działaniu promieniowania rozproszonego – (00t-L), są porównywalne z wahaniami temperatury w budynku ciężkim – (s0t-C), który jest poddany działaniu promieniowania całkowitego (dwa środkowe wykresy z rys. 7.1.1a). Zakumulowane w ścianie ciężkiej ciepło wyrównuje temperaturę wnętrza budynku skuteczniej, niż przy ścianie lekkiej. Natomiast duża jej pojemność cieplna ma wpływ na obniżanie temperatury wewnętrznej. W obu budynkach widoczne są parogodzinne przesunięcia maksimum temperatury wewnętrznej, w stosunku do temperatury otoczenia. Temperatura w budynku lekkim, przy całkowitym promieniowaniu słonecznym – (s0t), mimo dobowych wahań temperatury zewnętrznej, w przeciwieństwie do budynku ciężkiego, jest stale wyższa od maksymalnej temperatury otoczenia. Dlatego też budynek lekki wymaga intensywniejszego odbioru ciepła poprzez wzmożoną wymianę powietrza wentylacyjnego.





Rys. 7.1.1. Temperatura w budynku „L” i „C”. Brak okien i wentylacji, a) przebieg miesięczny, b) przebiegi dobowe

Rysunki 7.1.2 oraz 7.1.3 odnoszą się do punktu 2, a więc do budynków pozbawionych okien. Obiekty te są wyposażonych w otwory wentylacyjne o podstawowej powierzchni. W budynku ciężkim spadki temperatur są prawie dwa razy wyższe. Liczba wymian powietrza dla wszystkich przypadków jest bardzo podobna z racji niewielkiej różnicy w gęstości powietrza – (rys. 7.1.3a i 7.1.3b).

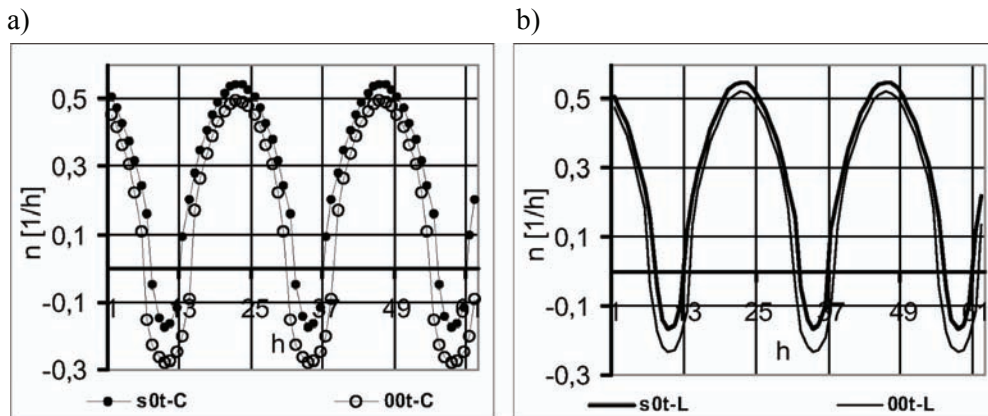


Rys. 7.1.2. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej w budynku lekkim „L” i ciężkim „C”. Brak okien. Wentylacja przy podstawowych otworach

W obu obiektach występują przepływy odwrotne w okresach, kiedy temperatura otoczenia przekracza wartość temperatury wewnętrznej. Analizowaną powyżej sytuację można odnieść do kondycji obiektu ze szczelnymi, zasłoniętymi oknami, przy których przepływ powietrza przez budynek jest bardzo silnie tłumiony.

Wyniki symulacji numerycznych dla nr 3–8 dotyczą oddziaływania promieniowania słonecznego na budynek, które pozyskiwane jest za pośrednictwem okien. Wartość tych zysków energetycznych zależy od powierzchni okien oraz ich orientacji w przestrzeni. Natomiast wpływ promieniowania na wysokość temperatury

w pomieszczeniu, a stąd na ilości przepływającego powietrza przez budynek, zależy od struktury materiałowej wewnętrznych i zewnętrznych przegród nieprzezroczystych. Energetyczne zyski słoneczne, docierające do wnętrza pomieszczenia przez okna, sumują się z zyskami pochodzącymi z wewnętrznych źródeł ciepła. Proces ten generuje większy deficyt gęstości powietrza, a tym samym zwiększa się ilość wymienianego powietrza w obiekcie.



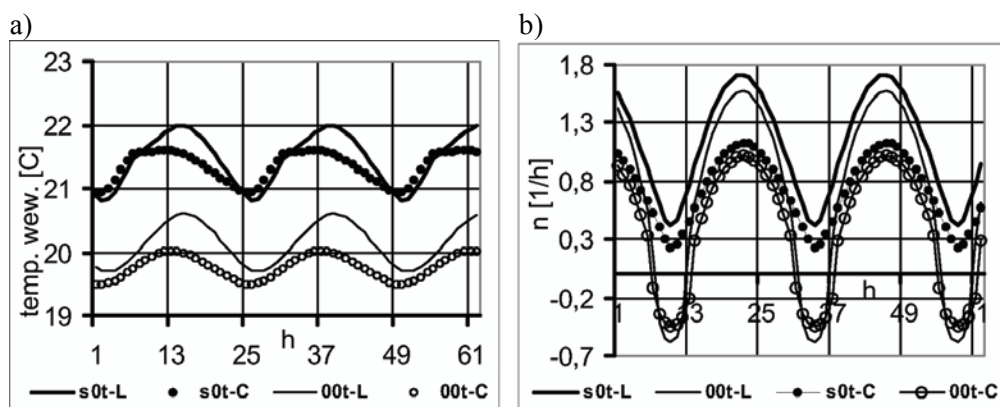
Rys. 7.1.3. Dobowe przebiegi liczby wymian powietrza przy podstawowej powierzchni otworów wentylacyjnych w obiekcie bez okien:

a) ciężkim „C”, b) lekkim „L”

Promieniowanie słoneczne, przepuszczane przez przegrody przezroczyste obu budynków, jest dla poszczególnych orientacji i powierzchni okien identyczne, tak jak i warunki eksploatacyjne obiektów. Zakładana powierzchnia otworów wentylacyjnych umożliwiła, zależnie od struktury materiałowej przegród, ustalanie się temperatury w pomieszczeniu, w obu budynkach, o podobnej wartości.

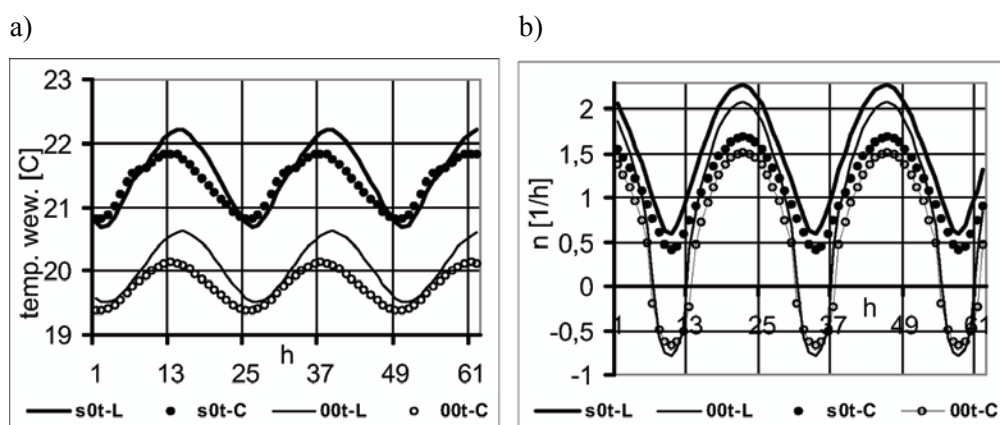
Rysunek 7.1.4 przedstawia dobowe przebiegi temperatury i liczby wymian powietrza wentylacyjnego w obiekcie ciężkim i lekkim, z oknem zwróconym na wschód – symulacja nr 3. Przyjęto dwukrotną powierzchnię otworów wentylacyjnych w budynku ciężkim, a w lekkim – trzykrotną. Dobowy przebieg temperatury w budynku ciężkim jest bardziej wyrównany, niż w lekkim, więc wahania pomiędzy dniem i nocą, przy przegrodach ciężkich, są mniejsze, niż przy lekkich. W budynku ciężkim, przy promieniowaniu całkowitym – (s0t), maksymalną temperaturę –  $21,6^{\circ}\text{C}$  wewnątrz osiąga w godzinach rannych i utrzymuje bardzo zbliżoną jej wartość do godzin popołudniowych. W obiekcie lekkim przegrody akumulują ciepło w niewielkim zakresie. Temperatura w pomieszczeniu rośnie sukcesywnie osiągając maksimum –  $22^{\circ}\text{C}$  po południu. W przypadku promieniowania rozproszonego – (00t) przebieg temperatury jest symetryczny, ale przesunięcia maksymalnej temperatury są w obu budynkach wyraźnie widoczne – (rys. 7.1.4a). Należy podkreślić, że w budynku lekkim uzyskanie zbliżonych temperatur do tych, jakie panują w budynku ciężkim, wymaga zwiększenia o około 50% ilości wymienianego powietrza. Przy promieniowaniu rozproszonym, w czasie kiedy temperatura otoczenia osiąga swoją

najwyższą wartość, wyższą od temperatury wewnętrznej, występują przepływy odwrotne. Wypór termiczny jest wówczas mniejszy, niż przy promieniowaniu całkowitym, bo pozbawiony jest wpływu promieniowania bezpośredniego – (00t). Z wykresów temperatury na rys. 7.1.4a wynika, że w dzień pochmurny – (00t) należy wspomagać przepływ mechanicznie.



Rys. 7.1.4. Budynki „C” i „L” z oknem wschodnim. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

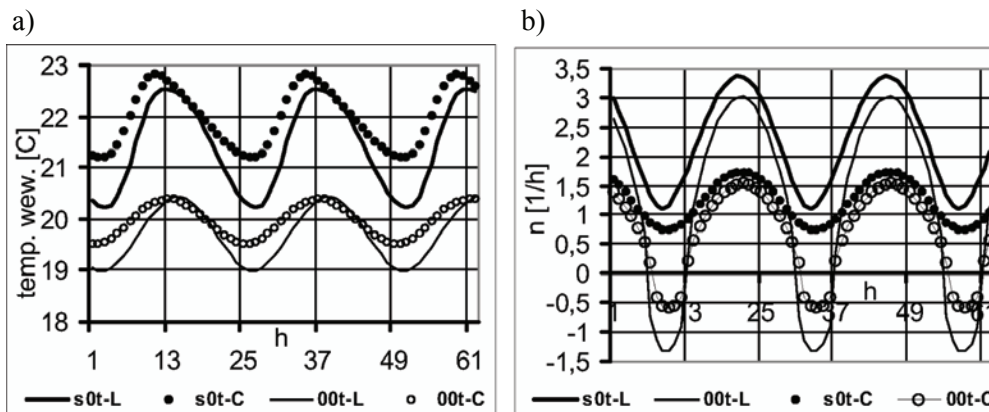
Symulacje numeryczne, które odnoszą się do nr 4 – (rys. 7.1.5), obejmują wzrost promieniowania słonecznego w wewnętrznych zyskach energetycznych, dzięki oknu na ścianie zachodniej. Płaszczyzna zachodnia otrzymuje w lecie najwyższe sumy tak promieniowania bezpośredniego jak i rozproszonego, dlatego też okno o orientacji zachodniej ma najmniejszą powierzchnię ze wszystkich rozpatrywanych w budynku okien. Na końcu bieżącego rozdziału zamieszczono wykresy o zyskach słonecznych poszczególnych przegród budynku. Okno o orientacji za-



Rys. 7.1.5. Budynki „C” i „L” z oknem wschodnim i zachodnim.  
Dobowe przebiegi: a) temperatury wewnętrznej,  
b) liczby wymian powietrza

chodniej ma powierzchnię  $1,5\text{m}^2$  i stanowi 10% całkowitej powierzchni ściany. Oba zaś okna o orientacji wschodniej (symulacja nr 3) i zachodniej stanowią 24% powierzchni podłogi, a więc znacznie przekraczają wymagania dotyczące zapewnienia naturalnego oświetlenia pomieszczeń. Wymagania te wyznaczają powierzchnię okien równą 14% powierzchni podłogi pomieszczenia [69]. Powierzchnia okien przekłada się nie tylko na zyski energetyczne, pochodzące z promieniowania słonecznego, ale także na straty ciepła, które są niepożądane w sezonie grzewczym.

Obliczenia dla budynków z oknem wschodnim i zachodnim prowadzono w budynku ciężkim z potrójną powierzchnią, w stosunku do powierzchni podstawowej otworów, a w lekkim – czterokrotną. Zamieszczone na rys. 7.1.5 wykresy wykazują bardzo niewielką zwyżkę temperatury wewnętrznej w stosunku do przebiegów z rys. 7.1.4. Rezultat ten jest wynikiem zwiększonej ilości powietrza przepływającego przez budynek. Przy obecnej powierzchni i orientacji okien widoczne są większe wahania dobowe temperatury, z racji zwiększonych sum promieniowania słonecznego – (rys. 7.1.5a). Dostarczone do pomieszczenia, za pośrednictwem okien, słoneczne zyski energetyczne, które pochodzą z promieniowania rozproszonego, są jednak zbyt małe, by razem z wewnętrznym źródłem ciepła generować wystarczająco duży wypór termiczny, który uniemożliwiłby występowanie odwrotnych przepływów powietrza. Przepływy odwrotne powstają w godzinach południowych. Przy promieniowaniu całkowitym, podobnie jak przy oknie wschodnim, występuje jedynie osłabienie przepływu. Jest ono jednak w tym wypadku mniejsze, z racji wyższych temperatur wewnętrznych.

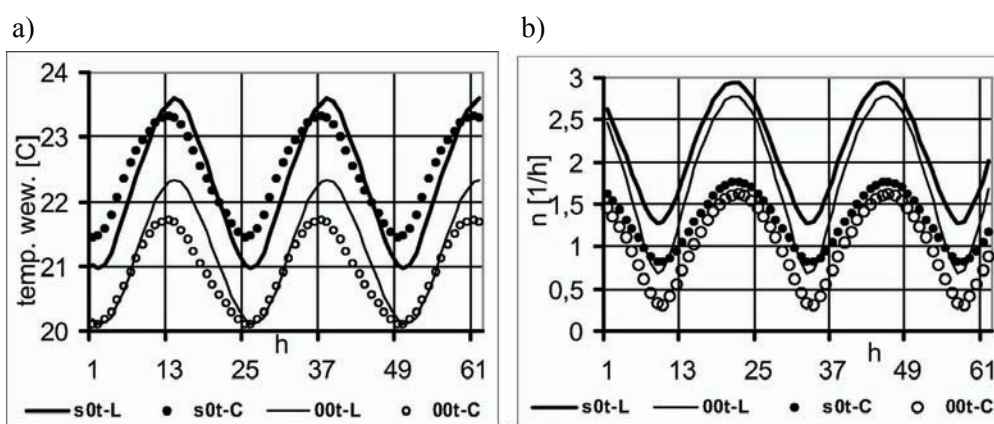


Rys. 7.1.6. Budynek „C” i „L” z oknem południowym.  
Dobowe przebiegi: a) temperatury wewnętrznej,  
b) liczby wymian powietrza

Kolejną symulację nr 5, której wyniki przedstawia rys. 7.1.6, wykonano dla budynku z oknem zlokalizowanym jedynie w ścianie południowej. Okno posiada  $7,5\text{m}^2$  powierzchni, co odpowiada 50% powierzchni ściany i 30% powierzchni podłogi. W obecnej praktyce projektowej niezwykle popularne jest przeszklenie ściany południowej. Rozwiązanie to, korzystne w przejściowych porach roku, podwyższa

koszty eksploatacji obiektów, tak w okresie letnim jak i zimowym. Przyjęta, tylko dla celów badawczych, wielokrotność powierzchni otworów wentylacyjnych, dla budynku ciężkiego i lekkiego, wynosi odpowiednio 3 i 6. Budynek lekki utrzymuje temperaturę zbliżoną do temperatury w budynku ciężkim, przy tej nierealnie zwiększonej, powierzchni otworów wentylacyjnych.

Przepływ powietrza przez budynek ciężki, przy udziale całkowitego promieniowania słonecznego – ( $s_{0t}$ ), jest daleko bardziej wyrównany niż w budynku lekkim – (rys. 7.1.6b). Zjawisko to jest także wynikiem bardziej wyrównanej temperatury, panującej w budynku ciężkim. Przy promieniowaniu rozproszonym i niewielkiej mocy wewnętrznych źródeł ciepła – ( $0_{0t}$ ), występują przepływy odwrotne.

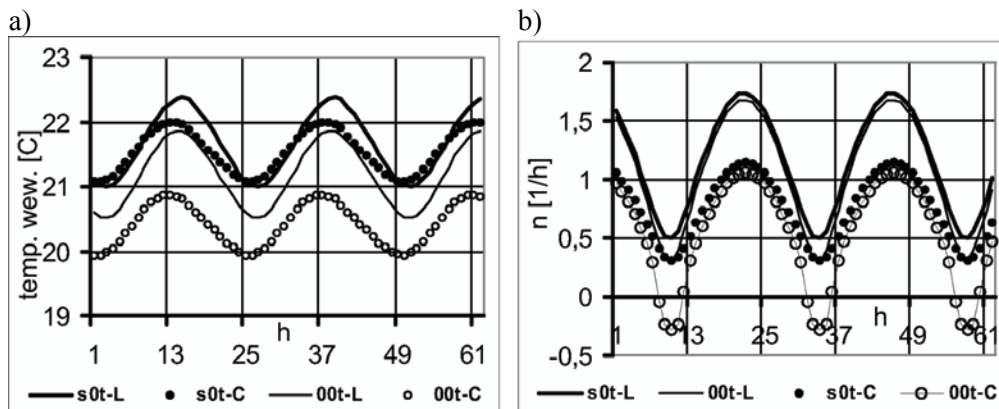


Rys. 7.1.7. Budynek „C” i „L” z oknami: północnym, wschodnim i zachodnim. Dobowe przebiegi: a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

Kolejna symulacja dotyczy cyklu nr 6, a jej wyniki przedstawia rys. 7.1.7. Wykresy pokazują dobowe przebiegi temperatur z oknami – od północy, wschodu i zachodu. Okno północne ma największą powierzchnię, równą  $9 \text{ m}^2$ . Stanowi ona 60% powierzchni ściany. Razem z oknem wschodnim i zachodnim odpowiada 60% podłogi pomieszczenia. Okno o orientacji północnej przekazuje głównie zyski energetyczne, pochodzące z promieniowania rozproszonego. Jedynie tuż po wschodzie i tuż przed zachodem słońca przegroda o tej orientacji otrzymuje niewielkie sumy promieniowania całkowitego [21]. Udział promieniowania rozproszonego w całkowitym przekracza 50%. Dlatego też nie należy całkowicie lekceważyć powierzchni budynków, w tym okien o orientacji północnej. Symulację badanych procesów w budynku lekkim, przy tej powierzchni i orientacji okien, przeprowadzono, z nierealnie bo pięciokrotnie zwiększoną do podstawowej, powierzchnią otworów wentylacyjnych. W budynku ciężkim pozostawiono powierzchnię otworów wentylacyjnych na poziomie 3, tzn. jak przy oknie wschodnim i zachodnim. Wzrost temperatury wewnętrznej w obu obiektach, nawet w porównaniu z budynkiem wyposażonym w okno południowe, jest wyraźny i należy przyjąć, że nie jest on akceptowany w przypadku  $s_{0t}$  przez większość użytkowników – (rys. 7.1.7a). Po raz pierwszy,

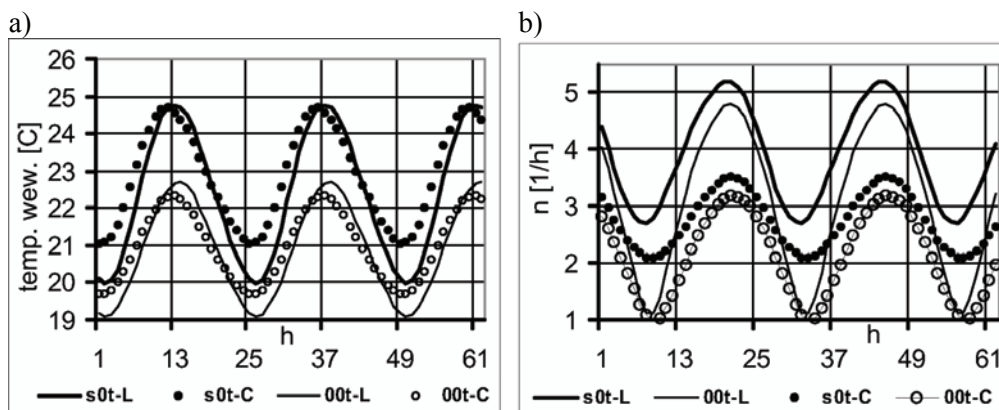
z dotychczas rozpatrywanych przypadków, przepływ powietrza przez budynek, skierowany jest zawsze do góry. Wypór termiczny powiększony udziałem promieniowania rozproszonego, docierającego przez okno północne o dużej powierzchni, przeciwdziała powstawaniu przepływów odwrotnych – (rys. 7.1.7b). Z porównania wykresów na rys. 7.1.6b i rys. 7.1.7b wynika, że w budynku lekkim maksymalne ilości powietrza, przepływającego przez budynek, są bardzo do siebie zbliżone.

Wykresy z rys. 7.1.8 dotyczą budynków jedynie z jednym oknem zorientowanym na północ – cykl nr 7. Dla utrzymania temperatury w pomieszczeniu, w zakresie 20–22,6°C, przyjęto podwójną powierzchnię otworów wentylacyjnych w budynku ciężkim, a potrójną w lekkim, jak przy oknie wschodnim. Temperatury wewnętrzne jak i strumienie objętości powietrza przy słonecznych zyskach energetycznych, dostarczanych przez okno wschodnie, jak i północne, są do siebie zbliżone, ale okno północne ma dwa razy większą powierzchnię od okna wschodniego.



Rys. 7.1.8. Budynki „C” i „L” z oknem północnym. Dobowe przebiegi:

a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

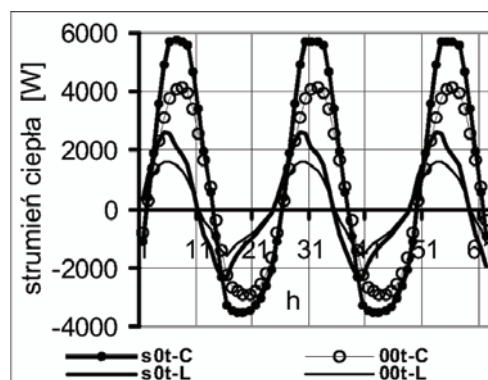


Rys. 7.1.9. Budynki „C” i „L” z oknami: północnym, wschodnim, południowym i zachodnim. Dobowe przebiegi:

a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

Ostatnia, ósma symulacja numeryczna dotyczy obiektów wyposażonych we wszystkie cztery okna – (tablica 7.1.1). Sumaryczna powierzchnia okien wynosi  $22,5\text{m}^2$ , co stanowi 90% powierzchni podłogi. Z wykresów na rys. 7.1.9 wynika, że wzrost zysków energetycznych z całkowitego promieniowania słonecznego w pomieszczeniu jest tak duży, że nawet w budynku ciężkim, konwencjonalny sposób odprowadzania ciepła z pomieszczenia poprzez wentylację naturalną, jest nieskuteczny. Jedynie w dni pochmurne warunki temperaturowe w pomieszczeniu mogą być akceptowane – (00t); (rys. 7.1.9). W budynku lekkim intensywność wymiany powietrza może wyzwać uczucie dyskomfortu użytkowników – (rys. 7.1.9b).

Wykresy na rys. 7.1.10 przedstawiają dobowy przebieg strumienia ciepła akumulowanego w obu badanych budynkach i odnoszą się do sytuacji, kiedy obiekty nie mają okien i otworów wentylacyjnych (cykl obliczeniowy nr 1).

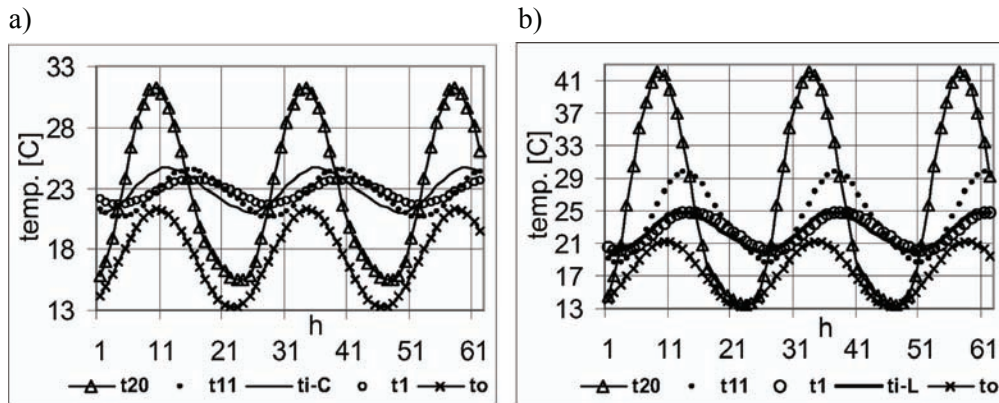


Rys. 7.1.10. Dobowe przebiegi strumienia ciepła akumulowanego w budynkach „C” i „L” przy całkowitym i rozproszonym promieniowaniu słonecznym

Wymiana ciepła w tym wypadku zachodzi jedynie na drodze przenikania przez ściany i dach obiektu. Zdolność do akumulacji ciepła przez ścianę ciężką, której gęstość materiału wynosi  $1800\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , a ciepło właściwe  $840\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , jest ponad dwukrotnie wyższa niż przegrody lekkiej. Wskaźniki dla wełny mineralnej wynoszą odpowiednio  $130\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  i  $750\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Różnica tkwi więc w gęstości materiału, bo obie wartości ciepła właściwego są porównywalne. Różnica temperatur pomiędzy warstwami wełny mineralnej jest średnio dwukrotnie większa niż przy cegle. W przypadku niewielkiej pojemności cieplnej ścian wzrasta udział akumulowanego ciepła w powietrzu. Występuje też w obu rodzajach przegród, przesunięcie ekstremalnych wartości, które wynosi ok. 3 h – (rys. 7.1.5).

Struktura materiałowa ściany znajduje odbicie w rozkładzie temperatury w warstwach poszczególnych przegród. Rysunki 7.1.11a i 7.1.11b przedstawiają dobowe wahania temperatury w pierwszej, wewnętrznej –  $t_1$ , środkowej –  $t_{11}$  oraz ostatniej, zewnętrznej –  $t_{20}$  warstwie stropodachu, w cyklu obliczeniowym nr 8, tj. z czterema oknami, i wymianą powietrza, jak na rys. 7.1.9b. W budynku ciężkim widoczna jest okresowa różnica pomiędzy temperaturą wnętrza –  $t_i$ , a temperaturą

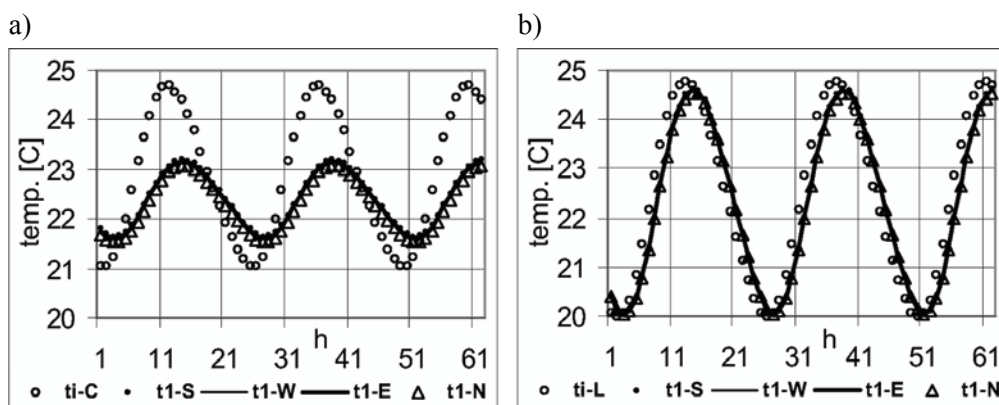
wewnętrznej warstwy stropu –  $t_1$ . Różnica ta wskazuje naprzemienne oddawanie i pobieranie przez strop ciepła z wnętrza obiektu.



Rys. 7.1.11. Dobowe przebiegi temperatur w: wewnętrznej –  $t_1$ , środkowej –  $t_{11}$  i zewnętrznej –  $t_{20}$  warstwie stropodachu budynku z oknami i wymianą powietrza jak na rys. 7.1.1. Wymuszenie  $s_{0t}$  dla budynku:

a) ciężkiego „C”, b) lekkiego „L”

W budynku lekkim proces ten w zasadzie nie zachodzi, ponieważ obie temperatury mają bardzo zbliżoną wartość. Analogiczny proces odbywa się w przegrodach pionowych budynków – (rys. 7.1.12). Temperatura w zewnętrznej warstwie stropu budynku lekkiego, w godzinach nocnych, spada do temperatury otoczenia, podczas gdy w budynku ciężkim jest o  $3^{\circ}\text{C}$  wyższa od temperatury otoczenia. Opór cieplny przegrody wpływa na temperatury zewnętrznych powierzchni ścian. Maksymalna temperatura ściany lekkiej, o orientacji wschodniej – (rys. 7.1.12), jest aż o  $9^{\circ}\text{C}$  wyższa od temperatury otoczenia, a ciężkiej tylko o  $2^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 7.1.12. Dobowe przebiegi temperatur w: wewnętrznej –  $t_1$ , środkowej –  $t_{11}$  i zewnętrznej –  $t_{20}$  warstwie przegród budynku z oknami i wymianą powietrza jak na rys. 7.1.1. Wymuszenie  $s_{0t}$  dla budynku: a) ciężkiego „C”, b) lekkiego „L”



Tablica 7.1.1 przedstawia skondensowany wykaz otrzymanych wyników obliczeń temperatur wewnętrznych i liczby wymian powietrza, przy przyjętej powierzchni i orientacji okien oraz wielokrotności powierzchni otworów wentylacyjnych, w obu badanych obiektach. Wyróżnikiem pomiędzy badanymi typami budynków, przy przyjętym założeniu, że temperatury wewnętrzne mają podobną wartość, są różnice w strumieniu objętości powietrza wentylacyjnego.

Większą lub mniejszą zgodność w dobowych wahaniami temperatur oraz ilościach przepływającego powietrza, dla poszczególnych cykli, uzyskano przy różnej – dla każdego z obiektów powierzchni otworów wentylacyjnych. Przy czym proces ten zachodzi niezależnie od tego, czy na budynek oddziałuje promieniowanie całkowite – s0t czy rozproszone – (00t).

Tylko przy całkowitym braku okien – (rys. 7.1.2) powierzchnie otworów wentylacyjnych, w obu obiektach, mają jednakową tzw. powierzchnię podstawową. Ale już przy oknie wschodnim podobne temperatury osiąga się, w budynku lekkim, przy trzykrotnej podstawowej powierzchni otworów wentylacyjnych, a w ciężkim dwukrotnej. W przypadku okna wschodniego i zachodniego proporcja ta wynosi 4 do 3, a przy południowym 6 do 3. Przy oknach – wschodnim, zachodnim i północnym relacja – powierzchni otworów wentylacyjnych, w stosunku do powierzchni podstawowej, wynosi w budynku lekkim i ciężkim 5 do 3, a przy oknie północnym 3 do 2, zaś w przypadku wszystkich okien 6 do 3.

Podane powyżej wielkości dowodzą, że odprowadzanie nadmiaru ciepła z budynku lekkiego wymaga wymiany powietrza, zwiększonej o ok. 50%. Wentylacja naturalna nie jest w stanie sprostać temu zadaniu, bo niemożliwe jest nieskończone zwiększanie otworów wentylacyjnych. Konieczne jest wsparcie mechaniczne, gdyż wymiana ciepła przez przegrody lekkie występuje w bardzo ograniczonym zakresie.

Istotnych informacji dostarczają wyniki przedstawione na rys. 7.1.1, gdzie brak jest w budynkach okien i otworów wentylacyjnych, a więc wymiana ciepła zachodzi jedynie przez ściany i dach budynku. Różnice w wartościach temperatur wewnętrznych muszą sugerować zróżnicowaną praktykę projektową. Uszczuplenie słonecznych zysków energetycznych, wynikające z braku promieniowania bezpośredniego, przy niewielkiej mocy wewnętrznego źródła ciepła, prowadzić będzie w obu obiektach do odwrotnych przepływów powietrza.

W budynku ciężkim proces ten ma głębszy charakter. Przy przyjętej powierzchni otworów wentylacyjnych i wszystkich oknach o czterech orientacjach, powietrze przepływające przez budynek ciężki nie zmienia kierunku. Dzieje się tak również w budynku lekkim, w przy oknach o orientacji północnej, wschodniej i zachodniej, a także przy pojedynczym oknie północnym. Przepływy odwrotne występują oczywiście czasowo w godzinach około-południowych i południowych. Są to okresy wyrównanej lub odwróconej gęstości powietrza otoczenia i wewnętrznego i wymiana powietrza ustaje lub zmienia swój kierunek, ale wówczas strumień objętości powietrza jest niewielki. Powstają wtedy niekorzystne zjawiska nie tylko z punktu widzenia użytkownika, ale także np. brak możliwości odprowadzania wilgoci z pomieszczenia.

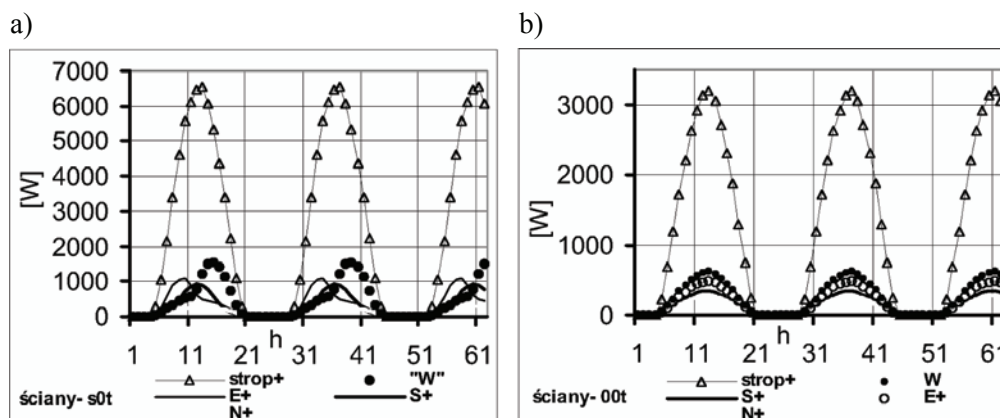
Tablica 7.1.1. Ekstremalne, dobowe wartości temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza wentylacyjnego w budynku jednostrefowym, przy braku wymuszenia wiatrem

|                                    |     |                  | budynek nr 1 „C” – s0t |                        | budynek nr 2 „L” – s0t |                        |
|------------------------------------|-----|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| wielokrotność pow. otworów wentyl. |     | orientacja okien | T <sub>i</sub> [°C]    | n [w·h <sup>-1</sup> ] | T <sub>i</sub> [°C]    | n [w·h <sup>-1</sup> ] |
| „C”                                | „L” |                  |                        |                        |                        |                        |
| 0                                  | 0   | brak okien       | 20,9–21,0              | –                      | 22,4–22,2              | –                      |
| 1                                  | 1   | brak okien       | 20,5–20,6              | (–0,17)–0,55           | 20,5–20,8              | (–0,15)–0,56           |
| 2                                  | 3   | E                | 21,0–21,6              | 0,25–1,13              | 20,8–22,0              | 0,41–1,70              |
| 3                                  | 4   | E, W             | 20,8–21,8              | 0,41–1,69              | 20,7–22,3              | 0,59–2,28              |
| 3                                  | 6   | S                | 21,2–22,8              | 0,74–1,73              | 20,2–22,5              | 1,11–3,37              |
| 3                                  | 5   | N, E, W          | 21,5–23,3              | 0,81–1,77              | 21,0–23,6              | 1,30–2,95              |
| 2                                  | 3   | N                | 21,0–22,0              | 0,31–1,14              | 21,0–22,4              | 0,49–1,74              |
| 3                                  | 6   | N, E, W, S       | 21,0–24,7              | 2,00–3,60              | 20,0–24,8              | 2,78–5,26              |
|                                    |     |                  | budynek nr 1 „C” – 00t |                        | budynek nr 2 „L” – 00t |                        |
| 0                                  | 0   | brak okien       | 19,5–19,6              | –                      | 21,1–21,3              | –                      |
| 1                                  | 1   | brak okien       | 19,2–19,3              | (–0,28)–0,49           | 19,8–20,1              | (–0,23)–0,52           |
| 2                                  | 3   | E                | 19,5–20,0              | (–0,43)–1,06           | 19,7–20,6              | (–0,58)–1,58           |
| 3                                  | 4   | E, W             | 19,4–20,1              | (–0,63)–1,50           | 19,5–20,6              | (–0,78)–2,08           |
| 3                                  | 6   | S                | 19,3–20,3              | (–0,58)–1,53           | 19,1–20,4              | (–1,33)–3,02           |
| 3                                  | 5   | N, E, W          | 20,1–21,7              | 0,32–1,60              | 20,1–22,3              | 0,68–2,76              |
| 2                                  | 3   | N                | 19,9–20,9              | (–0,28)–1,05           | 20,6–21,8              | 0,31–1,68              |
| 3                                  | 5   | N, E, W, S       | 19,7–22,4              | 1,00–3,14              | 19,0–22,8              | 0,98–4,82              |

Brak wewnętrznej masy akumulacyjnej, w przypadku budynku ciężkiego, wpływa minimalnie na wartość temperatury wewnętrznej, ponieważ ciepło tam zakumulowane w porównaniu z ciepłem zgromadzonym w przegrodach zewnętrznych jest niewielkie. W budynku lekkim obserwowany jest wzrost temperatury w wysokości 0,3–0,5°C.

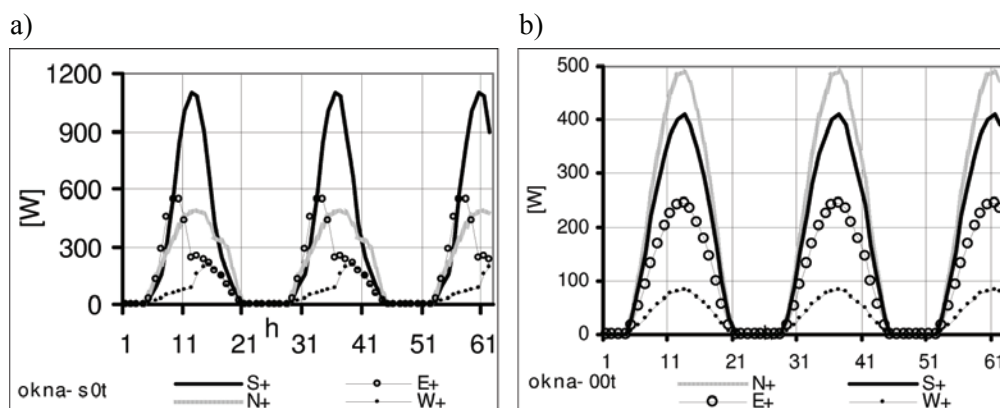
## 7.1.1. Energetyczne zyski słoneczne w analizowanych budynkach

Wykresy na rys. 7.1.13 i rys. 7.1.14 przedstawiają słoneczne zyski energetyczne na poszczególnych przegrodach i stropodachu, analizowanych budynków w uśrednionej dobie lipca.



Rys. 7.1.13. Energetyczne zyski słoneczne na całkowitą powierzchnię stropodachu i ścian budynku:

a) promieniowanie całkowite, b) promieniowanie rozproszone



Rys. 7.1.14. Energetyczne zyski słoneczne, pozyskiwane przez budynek przez okna:

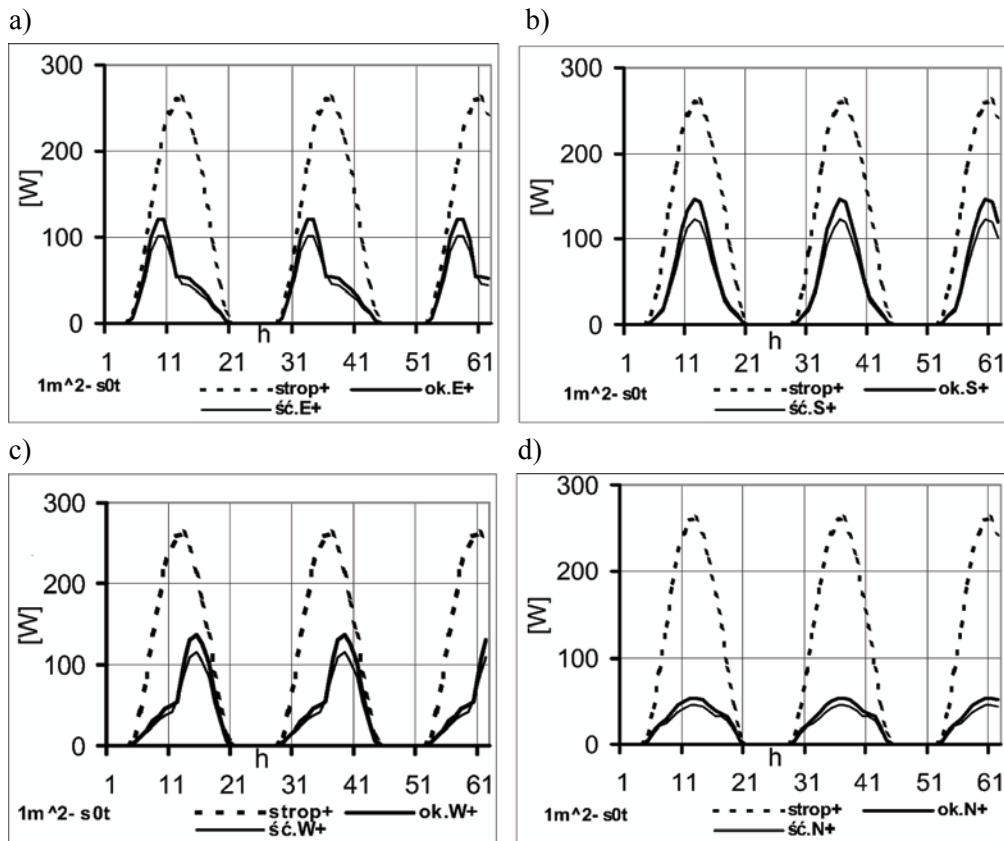
a) promieniowanie całkowite, b) promieniowanie rozproszone

Intensywność pozyskiwania słonecznych zysków energetycznych przez przegrody nieprzezroczyste budynku jest oczywiście różna. Miarą pozyskiwania padającego na powierzchnie przegród, o identycznych tynkach, ciepła jest zdolność przegrody do absorpcji ciepła i akumulacji, w swojej masie. Sumy dobowe, osiągnięte na zewnętrznych powierzchniach przegród nieprzezroczystych, są w obu budynkach takie same. Wahania tych wartości, od wschodu do zachodu słońca, przedstawiają wykresy na rys. 7.1.13. Ciepło pozyskiwane za pośrednictwem okien ma identyczną

wartość, bo powierzchnia, orientacja oraz transmisyjność szkła okiennego, jak i zacienienie budynków, jest jednakowe. Całkowite zyski energetyczne przedstawia dla promieniowania całkowitego rys. 7.1.14a oraz rys. 7.1.14b dla rozproszonego. Prezentowane wykresy odnoszą się do sum dobowych, osiągniętych na całkowitych powierzchniach przegrody, z uwagi na porównanie z mocą wewnętrznych źródeł ciepła.

Przebiegi dobowe zysków energetycznych, pochodzących z promieniowania całkowitego, obliczone na zewnętrznych powierzchniach ścian budynku, przesunięte są względem siebie w obrębie dnia, z racji zmiany wartości kąta padania promieni słonecznych.

W przypadku stropodachu budynku, przy najkorzystniejszym w tym okresie kącie padania promieni, są najwyższe i równomiernie rozłożone. Założono brak zacienienia dachu przy przyjętej zabudowie terenu.



Rys. 7.1.15. Energetyczne zyski słoneczne, pochodzące z promieniowania całkowitego, na powierzchni  $1 \text{ m}^2$  zewnętrznej warstwy przegród nieprzezroczystych i okna

Przy promieniowaniu rozproszonym, które pada na obiekt, ze wszystkich stron równomiernie i jest identyczne dla każdej orientacji, tak jak i współczynnik

zacienienia, dobowy rozkład zysków energetycznych na przegrodach jest symetryczny.

Trudno jest wyróżnić rzeczywistą wielkość całkowitych zysków energetycznych, przy różnych powierzchniach okien i ścian, dlatego też rys. 7.1.15 podaje moc cieplną słonecznych zysków energetycznych, przypadającą na  $1\text{m}^2$  przegrody nieprzezroczystej i niezależnie – okna przy orientacji: zachodniej, południowej, wschodniej oraz północnej. Najbardziej wyrównane są zyski energetyczne na stronie północnej, ale są one, przy przyjętych założeniach, trzy razy mniejsze niż na fasadzie południowej. Fasada zachodnia i południowa charakteryzuje się podobnymi warunkami cieplnymi, choć z racji różnej wartości kąta padania promieni słonecznych – przebiegi są względem siebie przesunięte.

### 7.1.2. Podsumowanie

Prezentowane w rozdziale 7.1 przebiegi temperatury wewnętrznej oraz strumienia objętości powietrza wentylacyjnego w budynku nr 1 i nr 2, są wynikiem występującej różnicy temperatur oraz oddziaływania promieniowania słonecznego. Pominięto wpływ wiatru na te procesy. W tabelicy 7.1.1 zestawiono ekstremalne wartości temperatury wewnętrznej z przebiegów dziennych i liczby wymian powietrza wentylacyjnego, uzyskane z kolejnych cykli obliczeniowych w obu budynkach. Celem badań było wykazanie różnic w komforcie użytkownika budynków o skrajnej pojemności cieplnej przegród zewnętrznych, eksploatowane w tych samych warunkach klimatycznych. Ponadto celem było także wskazanie i analiza powiązań przyczynowo-skutkowych kształtujących kondycję cieplno-przepływową w obiektach.

Badania te przeprowadzono nie tylko z uwagi na różną strukturę materiałową przegród zewnętrznych, ale także różne, w kolejnym cyklu obliczeniowym, zyski energetyczne pozyskiwane za pośrednictwem okien.

Większą lub mniejszą zgodność w dobowych wahaniami temperatur oraz ilości przepływającego przez budynek powietrza otrzymano przy różnej, dla każdego z obiektów, powierzchni otworów wentylacyjnych. Przy czym uzyskana zgodność odnosi się, niezależnie do sytuacji, w której działa na budynek promieniowanie całkowite bądź tylko rozproszone. Intensywność oddziaływania słońca na procesy wymiany ciepła i powietrza zależy, przy przyjętych założeniach, w tym identycznej transmisyjności szyb okiennych, głównie od struktury materiałowej przegród nieprzezroczystych. Dlatego też przy braku okien i otworów wentylacyjnych (cykl nr 1) temperatura w budynku lekkim jest wyższa, niż w ciężkim. O intensywności odprowadzania ciepła z pomieszczenia decyduje tu proces przenikania przez przegrody zewnętrzne, które charakteryzują się różnym oporem przenikania ciepła. Pozostałe przypadki dotyczą badań w budynkach o różnej orientacji i powierzchni okien.

Okna są podstawowymi elementami architektury słonecznej, stąd też kryteria projektowe przy ustalaniu powierzchni oraz orientacji okien w budynku o różnym oporze cieplnym przegród zewnętrznych, nie mogą być jednakowe. Są okresy, szczególnie w przejściowych porach roku, kiedy – niezależnie od struktury materiałowej przegród zewnętrznych – energetyczne zyski słoneczne, pozyskiwane przez duże przeszklone powierzchnie, są bardzo pożądanym składnikiem bilansu cieplnego.

go budynku. Okno jest jednak elementem, za pośrednictwem którego budynek zyskuje nie tylko pożądane ale i niepożądane słoneczne zyski energetyczne. W okresie zimowym okno powodują straty ciepła.

Z punktu widzenia bilansu cieplnego budynku i maksymalnego wykorzystania możliwości, jakie stwarza wentylacja naturalna w układzie hybrydowym, zadaniem projektanta jest stworzenie w obiekcie optymalnych warunków cieplnych i higienicznych w ciągu całego roku.

Do wykonania tego zadania, oprócz informacji podobnych do tych uzyskanych z przedstawianych tu badań, projektant musi dysponować wiedzą na temat dostępności promieniowania do obudowy budynku, w poszczególnych sezonach, jak i w ciągu całego roku. Znaczenie tych informacji może determinować lokalizacja, przeznaczenie i tryb eksploatacji budynku. Informacje dotyczą kąta pochylenia danej powierzchni do powierzchni ziemi i kąta azymutalnego. Niezbędne są także informacje na temat sposobów regulacji strumienia promieniowania słonecznego dopływającego do okna, m.in. przez sezonowe zacienianie powierzchni [34, 35, 46].

Należy zdawać sobie sprawę, że wynikiem tej regulacji jest uszczuplenie słonecznych zysków energetycznych, wynikające z braku promieniowania bezpośredniego, co w lecie – przy niewielkiej mocy wewnętrznego źródła ciepła – może prowadzić do zaniku przepływu lub zmiany jego kierunku – (tablica 7.1.1). Przepływy takie występują, oczywiście czasowo, w okresach wyrównanej lub odwróconej gęstości powietrza otoczenia i wewnętrznego. Są to niekorzystne zjawiska nie tylko z punktu widzenia użytkowników.

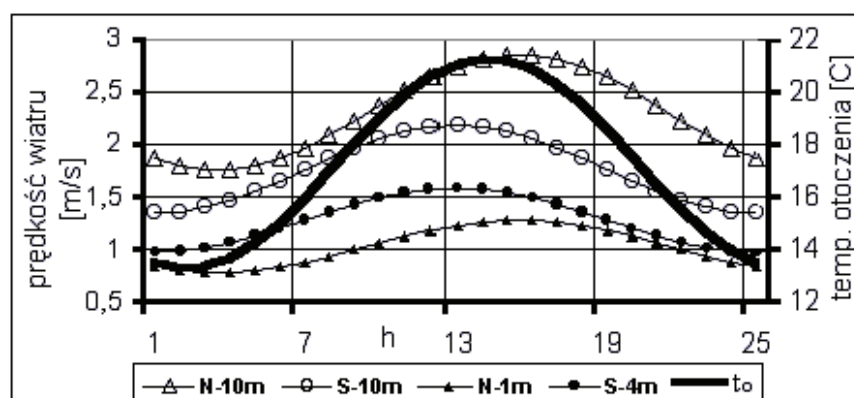
Podstawowym wyróżnikiem badanych typów budynków są opory cieplne przegród zewnętrznych, przy różnej dostępności promieniowania słonecznego przez okna – do wnętrza budynku. Wartość temperatury wewnętrznej i pośrednio ilość przepływającego powietrza przez budynek, wynika z intensywności procesu wymiany ciepła pomiędzy wnętrzem, a jego otoczeniem. Z jednej strony, intensywność procesu przewodzenia ciepła przez przegrody budynku determinuje wartość temperatury wewnętrznej, a więc i deficyt gęstości powietrza. Z drugiej zaś przepływ powietrza przez budynek wpływa na wartość temperatury wewnętrznej, a więc na intensywność wymiany ciepła przez przegrody. Dodatkowy wpływ na te procesy ma akumulacja ciepła, zachodząca w przegrodach budynku. Akumulacja w budynku ciężkim jest ponad 3-krotnie wyższa, niż w lekkim. Stąd wychładzanie ściany ciężkiej postępuje powoli i dlatego możliwe jest uzyskanie bardziej korzystnego przesunięcia minimalnej temperatury w pomieszczeniu, niż przy ścianie lekkiej. W badanych przypadkach wynosi ono  $\sim 3$  godziny.

## 7.2. Nieustalony przepływ ciepła i powietrza w obiektach jednostrefowych, przy pełnym wymuszeniu zewnętrznym

Bieżący rozdział dotyczy badania procesów cieplno-przepływowych w budynkach jednostrefowych, których dane zamieszczono w tablicach 6.1– 6.3 od nr 1 do nr 5, a widok obiektu przedstawia rys. 6.9. Okna we wszystkich pięciu budyn-

kach mają tę samą powierzchnię i ulokowane są w ścianach o trzech orientacjach. Ściana północna pozbawiona jest okna. Lokalizacja otworów wentylacyjnych jest taka sama, jak w budynkach analizowanych w punkcie 7.1, ale ich powierzchnia jest stała i odpowiada podwójnej powierzchni otworu podstawowego. Przebadano budynki zarówno z wewnętrzną masą akumulacyjną, jak i bez jej udziału. Przedstawione wyniki dotyczą budynków wyposażonych w wewnętrzną masę akumulującą ciepło z pomieszczenia. Przy powyższych założeniach, przebiegi temperatury i strumienie objętości powietrza będą wynikać ze struktury materiałowej przegród badanych obiektów oraz wymuszenia zewnętrznego. Wymuszenie to określa intensywność oddziaływania parametrów klimatu. Przy prowadzonych badaniach wymuszenie zewnętrzne, które działa na obiekt, uwzględnia także normalną składową wiatru kierunkowego. Toteż matematyczny opis procesu wymiany powietrza wentylacyjnego obejmuje pełną postać równania (5.13). Ciśnienie dynamiczne ( $\Delta p_v$ ) w przypadku wiatru północnego, który wspomaga przepływ powietrza przez budynek, sumuje się z członem statycznym, a przy wietrze południowym – odejmuje. Symulacje procesów w budynkach przeprowadzono dla lipca, a także dodatkowo dla maja oraz września. Moc wewnętrznych źródeł ciepła obecnie analizowanych budynków wynosi 300 W.

### 7.2.1. Nieustalona wymiana ciepła i powietrza w lipcu



Rys. 7.2.1. Dobowe wahania temperatury i prędkości wiatru północnego – N i południowego – S w lipcu, w Warszawie

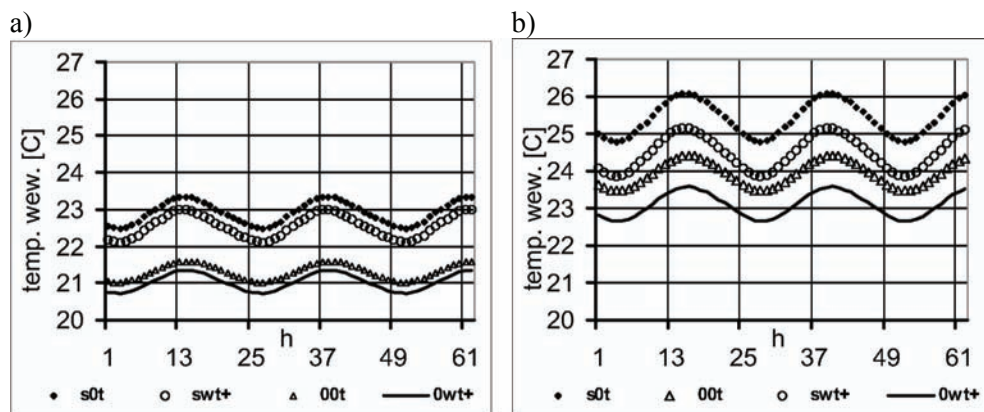
Rysunek 7.2.1 przedstawia uśrednione wartości temperatury otoczenia oraz prędkości wiatru. Prędkości wiatru mierzonego są na wysokości 10 m (IMGW). Podano także uśrednione przebiegi dobowe prędkości wiatru, wyliczone na wysokości dolnego oraz górnego otworu wentylacyjnego, odpowiednio 1 m i 4 m.

#### 7.2.1a. Budynek nr 1 i budynek nr 2

Na rys. 7.2.2a i 7.2.2b przedstawiono dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej w budynku nr 1 – ciężkim i nr 2 – lekkim. Z porównania przebiegów tem-

peratury na wykresach (s0t) i (swt) z (0wt) i (00t) wynika, że dominujący wpływ na wysokość temperatur w pomieszczeniu mają słoneczne zyski energetyczne. W okresach najintensywniejszej dziennej penetracji słonecznej występują największe wzrosty temperatury. Wielkość wzrostu zależy także od zdolności do akumulacji ciepła w ścianach. Przy przegrodzie ciężkiej, najwyższa temperatura w budynku nie osiąga  $23^{\circ}\text{C}$ , a jej wahania pomiędzy dniem i nocą wynoszą  $\sim 1^{\circ}\text{C}$ , podczas gdy w budynku lekkim, w analogicznym przypadku, temperatura jest wyższa o ponad  $2,5^{\circ}\text{C}$ . Obecność wiatru, wspomagającego przepływ powietrza wentylacyjnego, silniej wpływa na wartość temperatury w budynku lekkim, niż w ciężkim. W budynku ciężkim, z uwagi na jego masę, temperatura ściany obniża się wolniej.

Przedstawione wyniki wskazują, że w budynku o dużej pojemności cieplnej przegród, niezależnie od wartości parametrów klimatu, kształtowana w nim temperatura może być akceptowana przez większość użytkowników, podczas gdy w budynku o konstrukcji szkieletowej temperatura jest zbyt wysoka. Najwyższa temperatura w budynku lekkim wynosi  $26^{\circ}\text{C}$ , a najniższa  $23,6^{\circ}\text{C}$ , podczas gdy w ciężkim odpowiednio  $21,3^{\circ}\text{C}$  i  $23,3^{\circ}\text{C}$ .



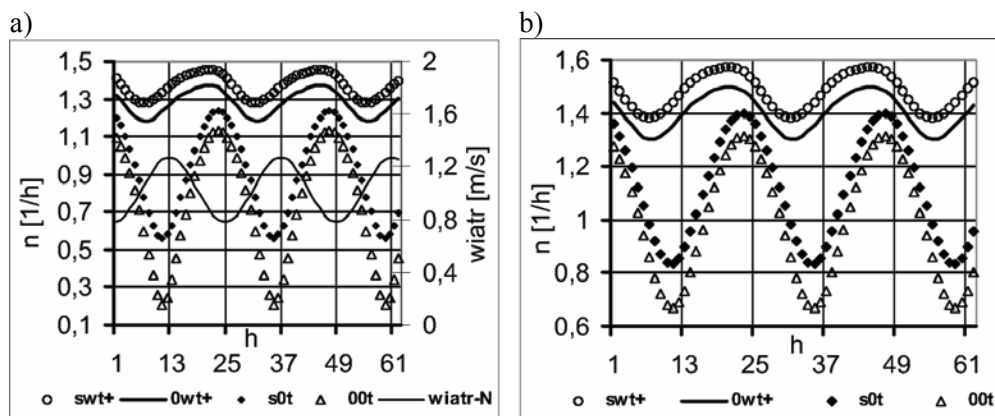
Rys. 7.2.2. Dobowe przebiegi temperatury w pomieszczeniu, w lipcu, przy wietrze wspomagającym: a) budynek nr 1, b) budynek nr 2

W przypadku budynku ciężkiego, którego wnętrze pozbawione jest dodatkowej masy powiększającej pojemność cieplną obiektu, nie obserwuje się znacznych różnic w dobowych przebiegach temperatury wewnętrznej. Natomiast w budynku lekkim temperatura podlega w ciągu doby większym wahaniom i występuje przesunięcie jej maksimum o około 2 h.

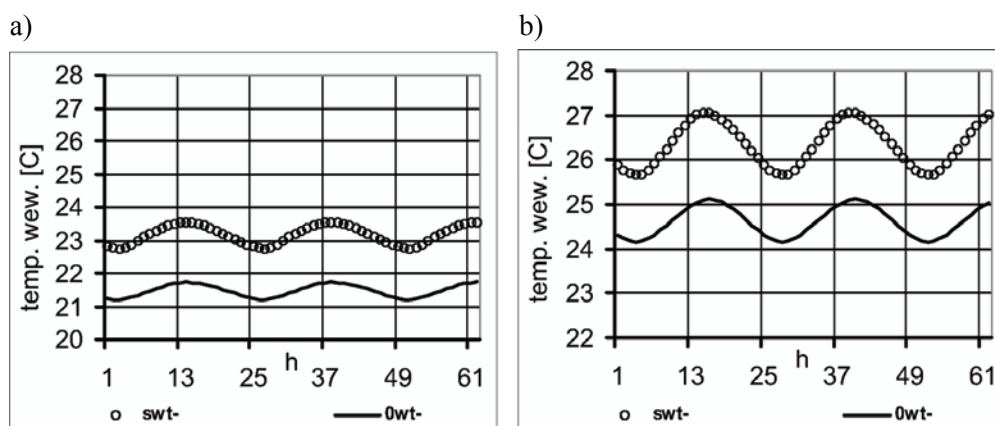
Porównując na rys. 7.2.3a i rys. 7.2.3b intensywność i charakter przepływu powietrza wentylacyjnego w obu budynkach zauważamy, że wiatr – w tym przypadku północny – którego składowa normalna skierowana jest na otwór dolny, doprowadzający powietrze do budynku, bardzo wyrównuje jego przepływ – (swt). Nawet brak bezpośredniego promieniowania słonecznego nie ma większego wpływu na intensywność wymiany powietrza – (0wt). Obecność słońca wzmacnia wypór termiczny i mimo braku wiatru – (s0t) chroni budynek ciężki przed zanikiem przepływu powietrza, chociaż temperatura wewnętrzna niewiele różni się od temperatury



otoczenia. W budynku lekkim panuje wyższa temperatura, a więc wymiana powietrza jest bardziej intensywna.



Rys. 7.2.3. Liczba wymian powietrza wentylacyjnego w pomieszczeniu, w lipcu, przy wietrze wspomagającym: a) budynek nr 1, b) budynek nr 2



Rys. 7.2.4. Dobowe przebiegi temperatury w pomieszczeniu, w lipcu, przy wietrze przeciwnym: a) budynek nr 1, b) budynek nr 2

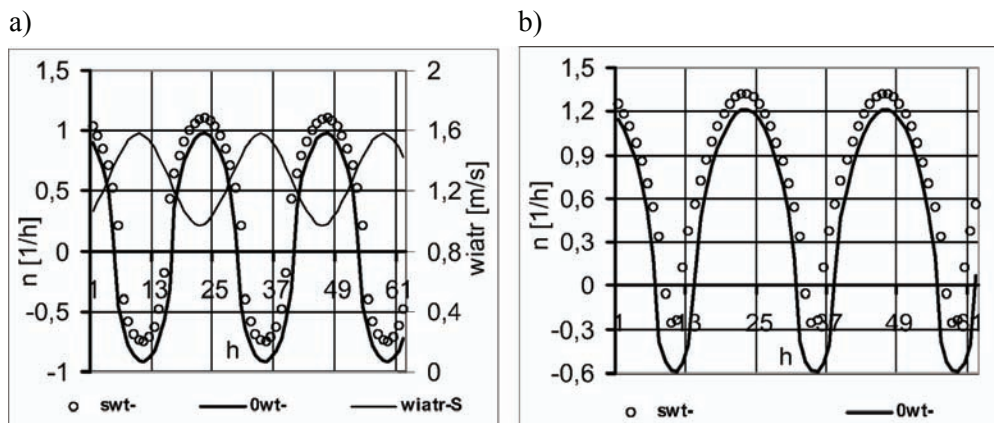
Przy wietrze przeciwnym – (rys. 7.2.4a i rys. 7.2.4b), tj. w sytuacji, kiedy składowa normalna wiatru skierowana jest na ścianę z otworem górnym – tzw. wylotowym, występuje tłumienie strumienia powietrza wentylacyjnego. W związku z tym zjawiskiem temperatura w pomieszczeniu – przy wspólnym działaniu słońca, wiatru i różnicy gęstości powietrza – jest najwyższa. Brak wiatru, siły tłumiącej przepływ – (s0t), powoduje spadek temperatury w tej sytuacji, gdyż wymiana powietrza w budynku jest intensywniejsza. Zdolności akumulacyjne ściany przy wietrze przeciwnym, wpływają na kształtowanie się temperatury w pomieszczeniu według tych samych reguł, jak przy wietrze wspomagającym przepływ powietrza. W budynku ciężkim, przy wietrze przeciwnym, różnice w temperaturach wewnętrznych, w porównaniu z wiatrem wspomagającym są nieduże. W budynku lekkim –

znacznie większe. Maksymalna temperatura przy przepływie tłumionym wynosi  $27^{\circ}\text{C}$ , podczas gdy przy wietrze wspomagającym osiąga  $26^{\circ}\text{C}$ .

Wartość składowej normalnej, wiatru wiejącego od południa, jest wyższa (4 m nad gruntem) od składowej północnej (1 m nad gruntem) mimo, że wartość wiatru północnego – według danych IMGW (10 m nad gruntem) – jest wyższa niż południowego – (rys. 7.2.1). Tę relację kształtuje chropowatość terenu.

Brak wewnętrznej masy akumulacyjnej, przy wietrze przeciwnym, wytwarza podobną sytuację, jak przy wietrze wspomagającym. Temperatury wewnętrzne są wyższe, ale głównie w budynku lekkim i charakteryzują się większą amplitudą.

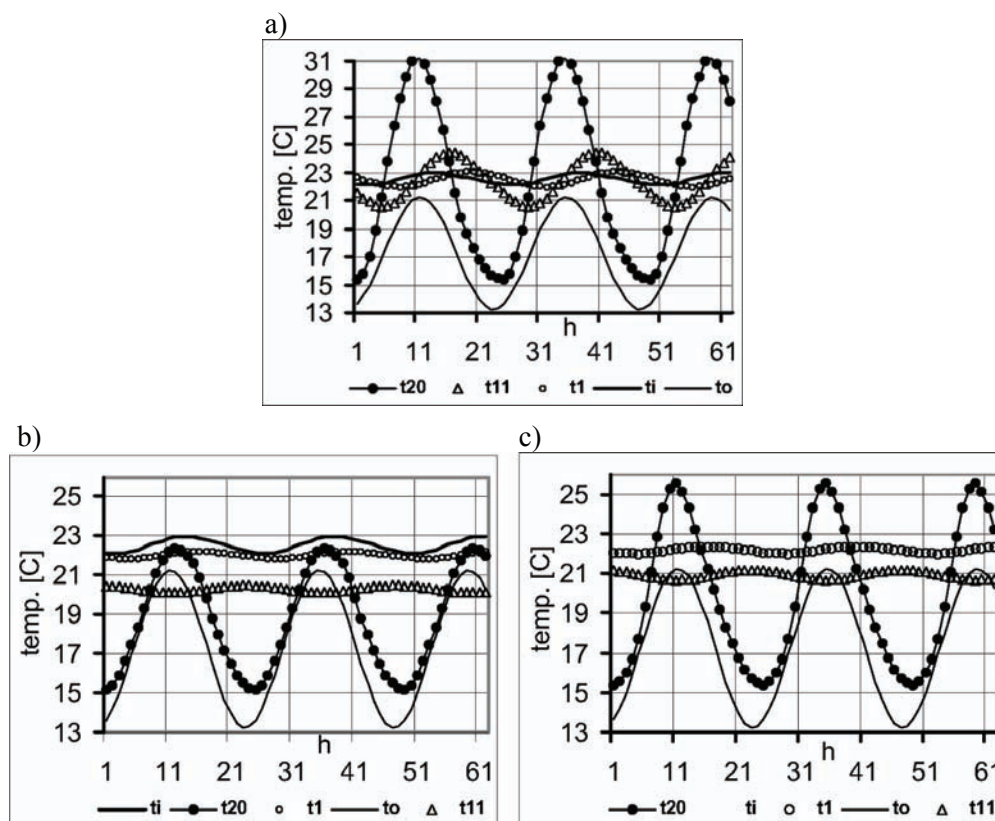
Wiatr przeciwny powoduje, że w budynku ciężkim – (rys. 7.2.5a), powstają przepływy odwrotne – (0wt), nawet w przypadku oddziaływania słońca – (swt). Ciśnienie dynamiczne góruje wówczas nad ciśnieniem statycznym. We wszystkich pokazanych na rys. 7.2.5a przypadkach, a szczególnie w obecności wiatru, naturalna wentylacja jest niewystarczająca i wymaga mechanicznego wspomaganie, bądź zwiększenia wydatku mocy źródła ciepła czy też korekcji otworów wentylacyjnych.



Rys. 7.2.5. Liczba wymian powietrza wentylacyjnego w pomieszczeniu, w lipcu, przy wietrze przeciwnym: a) budynek nr 1, b) budynek nr 2

Dynamika charakterystyk ciepłno-przepływowych budynku jest głównie wynikiem wymuszenia zewnętrznego oraz zdolności izolacyjnych przegród, w tym ich struktury materiałowej. Stąd też, dla głębszej analizy zagadnienia, przedstawiono dobowe wahania temperatury w zewnętrznej –  $20^{\circ}\text{C}$ , środkowej –  $11^{\circ}\text{C}$  i wewnętrznej –  $1^{\circ}\text{C}$  warstwie stropodachu budynku ciężkiego, z wewnętrzną masą akumulacyjną – (rys. 7.2.6a). Wymuszenie zewnętrzne stanowią: promieniowanie słoneczne, wiatr północny oraz różnica temperatur. Warstwa zewnętrzna, poddana bezpośrednio oddziaływaniu słońca, posiada wyższą temperaturę od temperatury zewnętrznej. W związku z tym występuje całodobowy proces oddawania ciepła do otoczenia. Jej maksymalna wartość przewyższa o  $\sim 10^{\circ}\text{C}$  najwyższą dobową temperaturę otoczenia. Temperatura minimalna, która wynosi niewiele poniżej  $15^{\circ}\text{C}$ , jest wyższa o około  $2^{\circ}\text{C}$  od minimalnej temperatury otoczenia. Warstwa środkowa, do której słońce nie dociera bezpośrednio, ma znacznie niższą temperaturę od warstwy ze-

wewnętrznej. W godzinach nocnych jest ona niższa zarówno od temperatury warstwy wewnętrznej, jak i temperatury w pomieszczeniu. Jej amplituda, wytłumiona przez materiał o dużej gęstości, wynosi  $\sim 2^{\circ}\text{C}$ . Temperatura warstwy wewnętrznej jest wyrównana i okresowo niższa od temperatury panującej w pomieszczeniu. Zachodzi więc zmienna w czasie wymiana ciepła pomiędzy wnętrzem a stropem. Występuje też przesunięcie pomiędzy maksymalnymi temperaturami, które wynosi około 6 h.



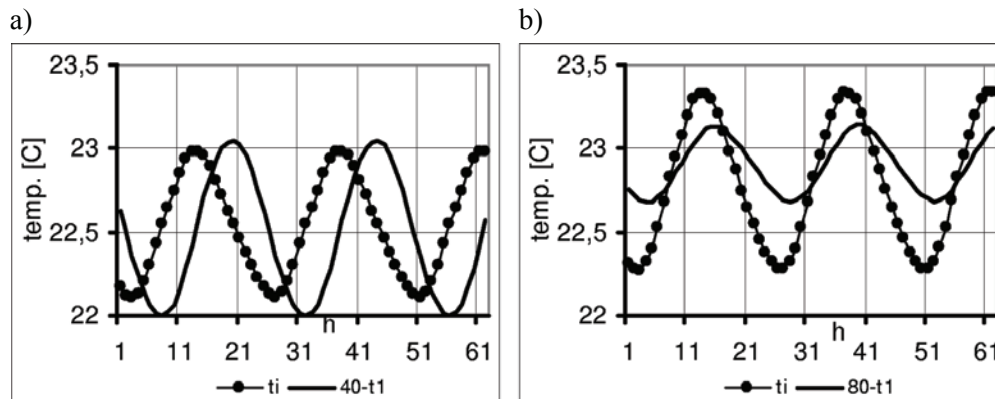
Rys. 7.2.6. Lipiec, budynek nr 1, wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi temperatury w: pierwszej, środkowej i zewnętrznej warstwie:  
a) stropu, b) ściany północnej, c) ściany południowej

W przypadku ściany północnej (rys. 7.2.6b), która nie jest poddana działaniu promieniowania słonecznego bezpośredniego, poza krótkimi okresami tuż po wschodzie i tuż przed zachodem słońca, temperatura warstwy zewnętrznej jest przez całą dobę niższa od temperatury panującej we wnętrzu obiektu. Od wschodu słońca do godzin południowych pokrywa się ona z temperaturą otoczenia. Stąd też ustaje wymiana ciepła pomiędzy ścianą a otoczeniem. W pozostałych godzinach proces ten zachodzi. Temperatura tej warstwy charakteryzuje się niższą amplitudą, niż analogiczna warstwa stropodachu. Podobnie jest w przypadku warstwy środkowej i wewnętrznej. Temperatury obu tych warstw są niemal stałe przez całą dobę, choć widoczne jest przesunięcie ich maksimum względem siebie. Temperatura wewnętrzna

jest zawsze wyższa od temperatury wewnętrznej warstwy ściany. Zachodzi więc całodobowy proces oddawania ciepła, jakkolwiek odbywa się on z różną intensywnością.

Temperatury w warstwach ściany południowej (rys. 7.2.6c), układają się podobnie jak w ścianie północnej, ale mają wyższą wartość. Ich amplitudy są wyższe, natomiast wymiana ciepła pomiędzy wnętrzem obiektu a warstwą wewnętrzną – mniej intensywna.

Wykresy z rys. 7.2.7 przedstawiają wpływ zdolności akumulacyjnych stropodachu o grubościach 40 cm i 80 cm w budynku ciężkim. Stropodach o grubości 80 cm jest oczywiście hipotetyczny, jakkolwiek spotykany w obiektach zabytkowych. 40–t1 i 80–t1 odnosi się do temperatury w pierwszej warstwie stropu. Dzięki zwiększonej masie stropu i ciepła w nim zakumulowanego, osiąga się tylko niewiele wyższą temperaturę wnętrza, ale daleko bardziej wyrównaną, bo o mniejszej amplitudzie.

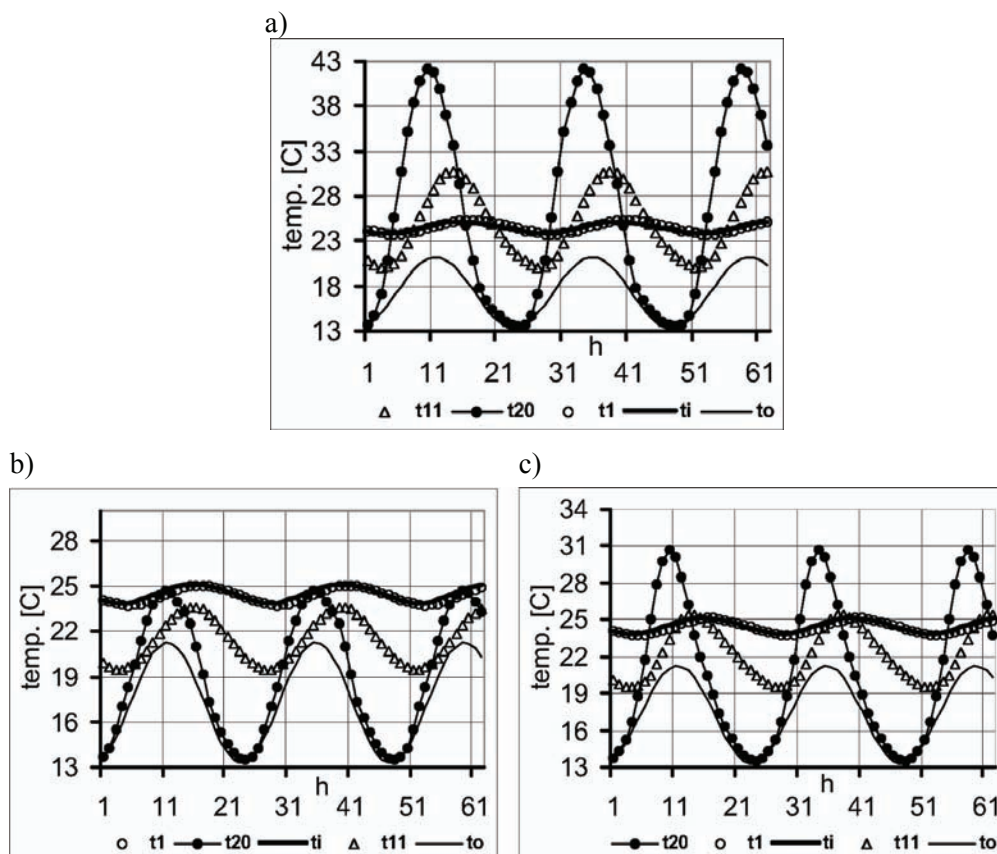


Rys. 7.2.7. Lipiec, budynek nr 1, wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi temperatury w 1 warstwie stropodachu o grubości: a) 40 cm, b) 80 cm

Z przedstawionych wykresów wynika, że przy przyjętych warunkach pogodowych i osiągniętej intensywności wymiany powietrza, temperatura wewnętrzna w budynku nr 1 jest zawsze wyższa, od temperatury warstwy wewnętrznej ścian. Zachodzi więc mniej lub bardziej intensywny proces odbioru ciepła z budynku. Z porównania przebiegów temperatur w ścianie północnej i południowej oraz w stropodachu wynika, jak istotny jest wpływ promieniowania całkowitego i rozproszonego, nie tylko na ich wartość, ale także na ich amplitudy. Przez stropodach, który ma dwukrotnie mniejszą grubość niż ściany, a operacja słoneczna jest dużo intensywniejsza, proces wymiany ciepła pomiędzy warstwą wewnętrzną a pomieszczeniem zachodzi przemiennie.

Z rys. 7.2.8a, b, c wynika, że w budynku nr 2, zarówno temperatura warstwy wewnętrznej stropodachu, jak i ściany, niezależnie od orientacji, pokrywa się z temperaturą wewnętrzną. Proces wymiany ciepła pomiędzy wnętrzem a pierwszą warstwą przegrody nieprzezroczystej w tego typu budynkach praktycznie nie zachodzi,

poza ścianą północną. Temperatury warstw zewnętrznych są znacznie wyższe, niż w budynku ciężkim. Opór przenikania ciepła przez przegrodę w stosunku do budynku ciężkiego, rośnie przy ścianie lekkiej ponad 3,5 krotnie, a przy stropodachu prawie 7-krotnie. Cały proces odprowadzenia ciepła z wnętrza budynku lekkiego spoczywa na wymianie powietrza wentylacyjnego.



Rys. 7.2.8. Lipiec, budynek nr 2, wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi temperatury w pierwszej, środkowej i ostatniej, zewnętrznej warstwie:  
a) stropu, b) ściany północnej, c) ściany południowej

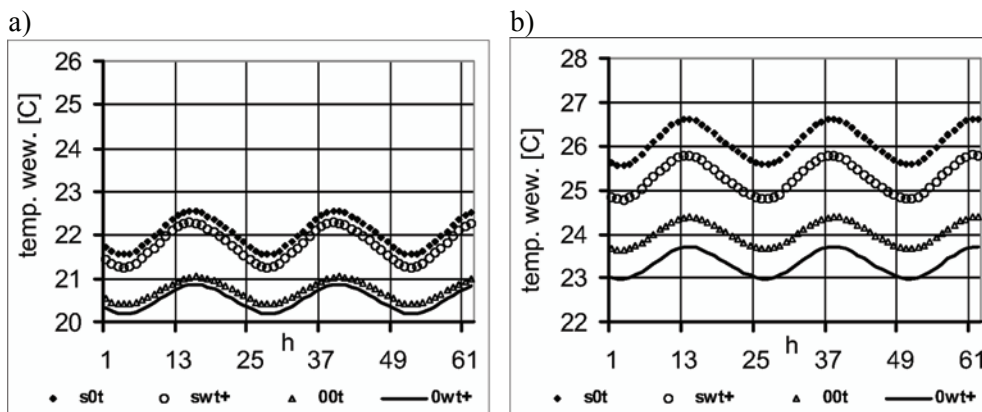
Promieniowanie słoneczne sprawia, że temperatura warstwy zewnętrznej w budynku nr 2 jest wyższa od temperatury otoczenia, następuje więc częściowy odpływ ciepła do otoczenia, a część ciepła przekazywana jest w głąb materiału. W godzinach pomiędzy zachodem i wschodem słońca wymiana ciepła ustaje.

#### 7.2.1b. Budynek nr 3 i budynek nr 4

Rysunki 7.2.9–7.2.14 dotyczą obiektów zbudowanych z cegły. Budynek nr 3, o grubości ścian 38 cm ma strop kleiowski zaizolowany 4 cm wełny mineralnej. Budynek nr 3 po dociepleniu ścian 10 cm styropianu, a stropu dodatkową 16 cm

warstwą wełny mineralnej stał się budynkiem nr 4. Dane charakteryzujące budynki nr 3 i nr 4 znajdują się w tablicach 6.1–6.3. Budynki nr 3, o podanej grubości ścian zewnętrznych, dość często występują na terenie naszego kraju i to właśnie one są najczęściej poddawane zabiegom termomodernizacyjnym. Prace te obejmują m.in. docieplenie przegród zewnętrznych materiałem izolacyjnym. Zabieg ten skutkuje podniesieniem oporu przenikania ciepła przez ściany. Spada więc zapotrzebowanie ciepła dla budynku w sezonie grzewczym. Zarazem obniżają się jednak słoneczne zyski energetyczne, które budynek pozyskuje przez przegrody nieprzezroczyste. W okresie letnim proces „wyhamowania” przenikania ciepła przez ściany z wnętrza budynku staje się źródłem jego przegrzania.

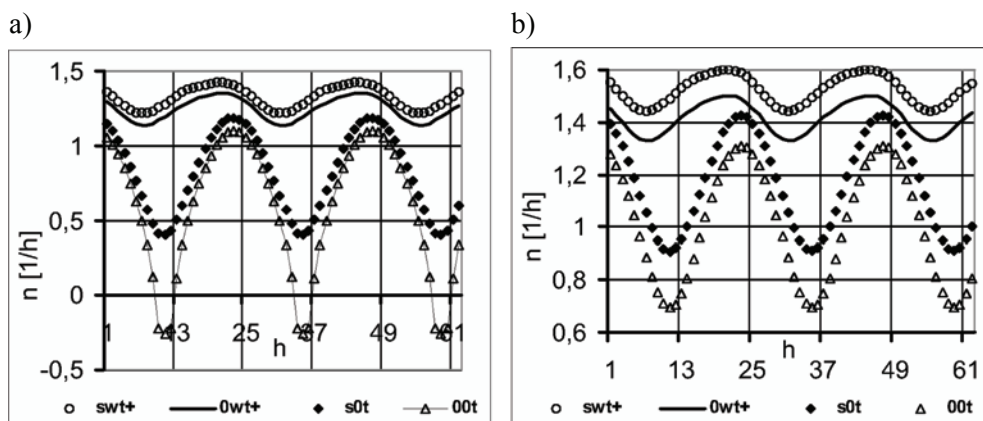
Rysunek 7.2.9a przedstawia dobowe wahania temperatury w budynku nr 3. Przy całkowitym promieniowaniu słonecznym, temperatury wynoszą od 21,3°C do 22,6°C. Przy braku promieniowania bezpośredniego spadają o około 1,5°C. Wymiana powietrza jest prawidłowa i wyrównana w ciągu doby, ale tylko w obecności wiatru wspomagającego – (swt); (rys. 7.2.10a). Ten sam poprawny charakter wymiany powietrza kształtowany jest także bez udziału promieniowania bezpośredniego – (0wt). Panująca jednak wtedy w pomieszczeniu temperatura może wydawać się użytkownikom zbyt niska – (rys. 7.2.9a). W budynkach zacienionych, gdzie brak jest promieniowania bezpośredniego i wpływ wiatru jest pomijalnie mały lub w okresach pochmurnych i bezwietrznych – wymiana powietrza jest niewystarczająca. W godzinach południowych występują odwrotne przepływy powietrza – (00t); (rys. 7.2.10a). Temperatura wewnętrzna jest porównywalna z temperaturą otoczenia. Zdolności akumulacyjne omawianej ściany nie są tak wysokie jak w budynku nr 1, a więc w mniejszym stopniu wpływają na wyrównanie temperatury wewnętrznej. Niższy także w tym wypadku opór cieplny ściany powoduje intensywniejszą wymianę ciepła z otoczeniem.



Rys. 7.2.9. Dobowe przebiegi temperatury w lipcu, przy wietrze wspomagającym:  
a) budynek nr 3, b) budynek nr 4

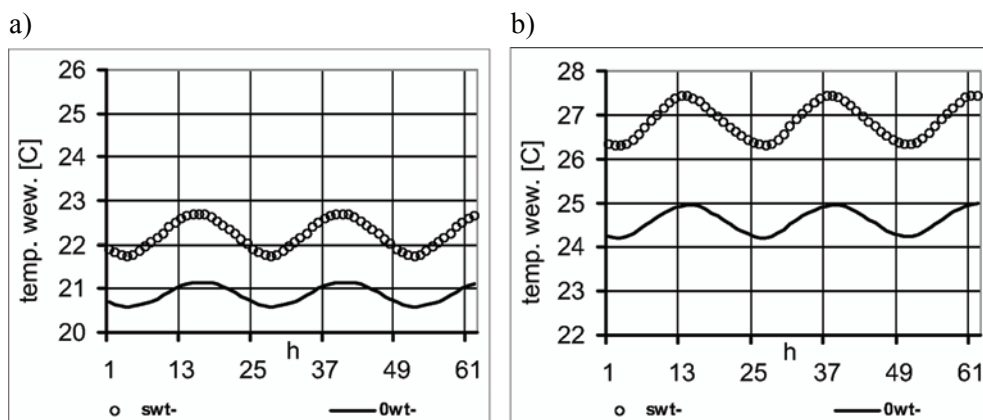
Rysunek 7.2.9b przedstawia dobowe przebiegi temperatur, przy wietrze wspomagającym, w budynku nr 4. W tym zaizolowanym cieplnie obiekcie najwyższa temperatura wynosi 26,7°C – (s0t), a najniższa występuje przy – (0wt) i jej war-

tość maksymalna wynosi  $23,8^{\circ}\text{C}$ . Tylko w tej sytuacji – (0wt), zarówno wymiana powietrza, jak i temperatura wewnętrzna, może odpowiadać oczekiwaniom użytkownika. Brak wewnętrznej masy akumulacyjnej waży w obu tych budynkach podobnie, jak w budynku lekkim. Przy wietrze wspomagającym powoduje dodatkowy wzrost temperatury w dzień, a spadek w godzinach nocnych – ok.  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Zmiany w ilości przepływającego powietrza są nieznaczne.



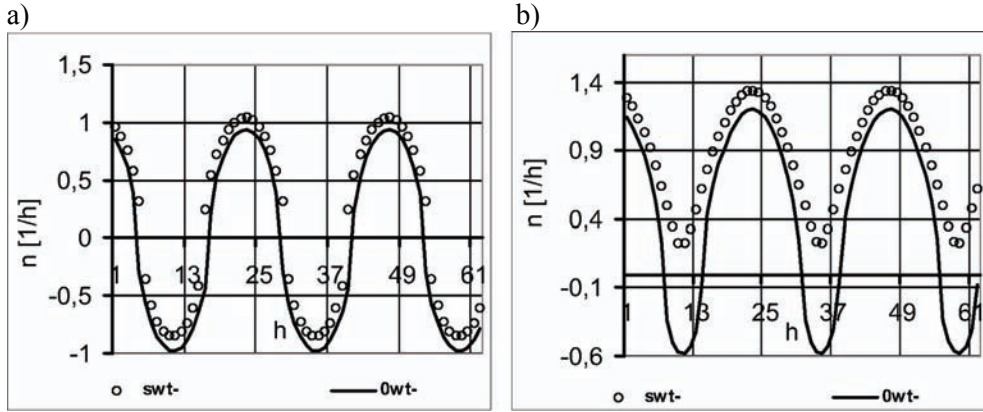
Rys. 7.2.10. Liczba wymian powietrza wentylacyjnego przy wietrze wspomagającym: a) budynek nr 3, b) budynek nr 4

Rysunki 7.2.11a i 7.2.11b pokazują dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej, które występują przy wietrze przeciwnym – południowym.



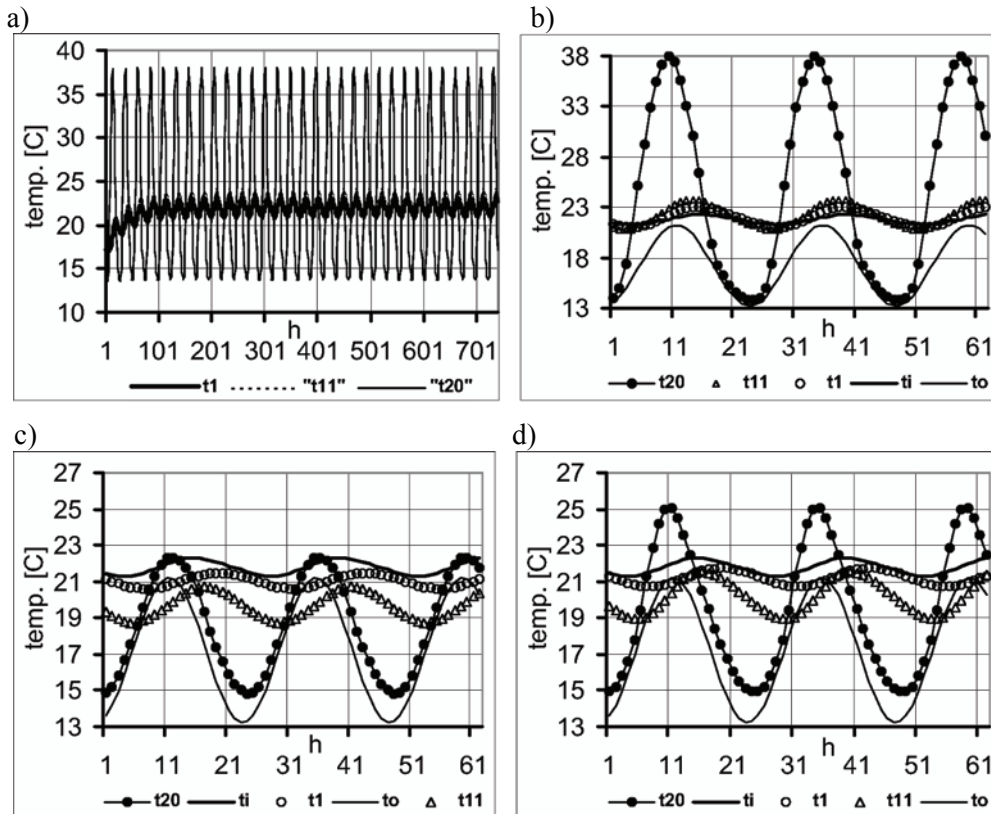
Rys. 7.2.11. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej w lipcu, przy wietrze przeciwnym: a) budynek nr 3, b) budynek nr 4

W budynku obłożonym styropianem najwyższa temperatura wewnętrzna osiąga wartość  $27,5^{\circ}\text{C}$ , a najniższa przekracza  $24^{\circ}\text{C}$ . W wyniku działania wiatru przeciwnego, w obu typach budynków powstają przepływy odwrotne (rys. 7.2.12a oraz 7.2.12b).



Rys. 7.2.12. Liczba wymian powietrza wentylacyjnego w lipcu, przy wietrze przeciwnym: a) budynek nr 3, b) budynek nr 4

Rysunki 7.2.13 i 7.2.14 przedstawiają dobowe przebiegi temperatury w warstwach przegród nieprzezroczystych budynków nr 3 i 4. Dodatkowo zamieszczono

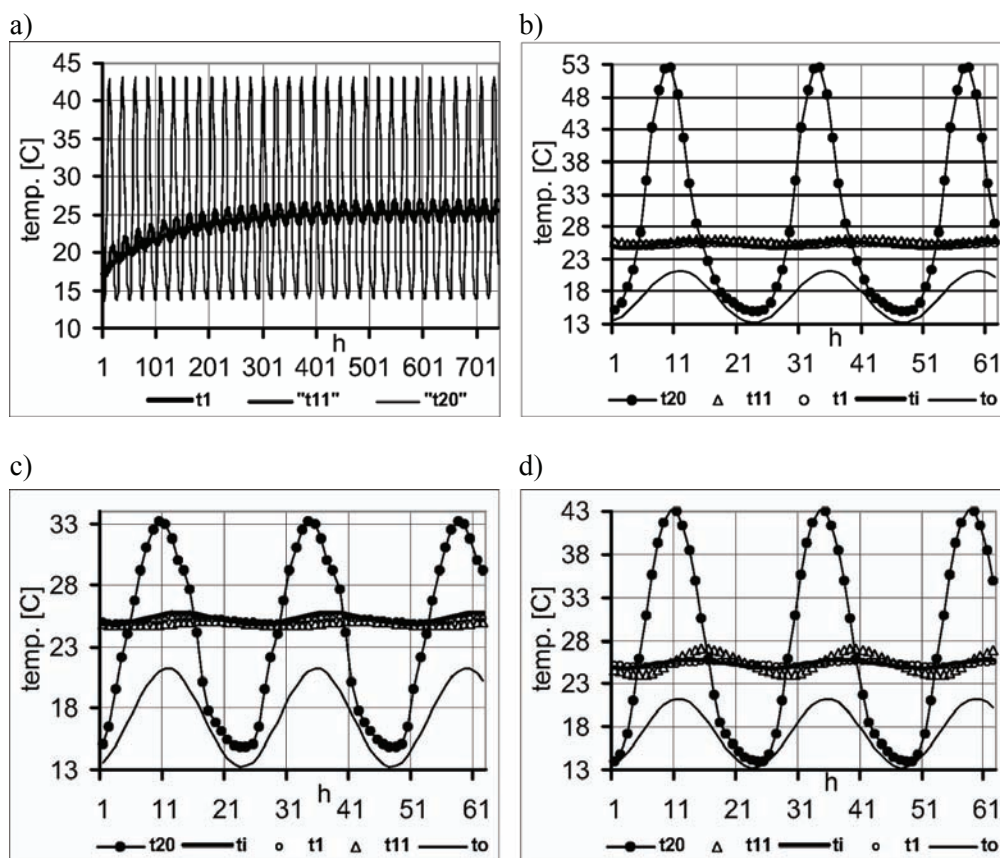


Rys. 7.2.13. Lipiec. Wymuszenie swt+. Budynek nr 3. Temperatury w pierwszej, środkowej i ostatniej, zewnętrznej warstwie: a) stropodachu – przebieg miesięczny, przebiegi dobowe: b) stropodachu, c) ściany północnej, d) ściany południowej



także miesięczne przebiegi temperatur, w celu zobrazowania jakościowego charakteru zjawiska – (rys. 7.2.13a i 7.2.14a).

Budynek nr 3 (38 cm cegły) osiąga stan równowagi termicznej (rys. 7.2.13a) w swoich dobowych wahaniami o około pięć dób wcześniej, niż budynek nr 1 – ciężki i trzy razy wolniej niż nr 2 – lekki – (rys. 7.1.1). Natomiast budynek nr 4 – ocieplony, w którym występuje gwałtowna zmiana oporu cieplnego ściany, przy przejściu ze styropianu na cegłę, osiąga stan równowagi bardzo powoli. Proces ten pokazuje rys. 7.2.14b.



Rys. 7.2.14. Lipiec. Wymuszenie swt+. Budynek nr 4. Temperatury w pierwszej, środkowej i ostatniej zewnętrznej warstwie: a) stropodachu – przebieg miesięczny, przebiegi dobowe: b) stropodachu, c) ściany północnej, d) ściany południowej

Zewnętrzna warstwa stropu budynku nr 3 (strop w tym budynku jest ocieplony 4 cm wełny mineralnej) pozostaje, w godzinach nocnych niemal w równowadze termicznej z otoczeniem – (rys. 7.2.13b). Oddawanie ciepła z warstwy wewnętrznej do wnętrza budynku zachodzi, w bardzo ograniczonym zakresie, jedynie w środku dnia. W środku nocy ma miejsce zjawisko odwrotne i warstwa pobiera ciepło z otoczenia. Ponadto ciepło gromadzone w warstwie środkowej stropodachu

przekazywane jest w głąb materiału, ale temperatura warstwy środkowej nie różni się wydatnie od temperatury warstwy wewnętrznej. Zbieżność temperatur jest największa w okresie nocnym.

W przypadku ściany północnej warstwa zewnętrzna, przez większość doby, oddaje ciepło do otoczenia. W godzinach rannych wymiana ciepła ustaje, ponieważ obie temperatury mają bardzo zbliżoną wartość. Temperatura wewnętrzna jest, przez całą dobę, wyższa od temperatury warstwy pierwszej. Zachodzi więc proces odbioru ciepła z pomieszczenia. Jedynie w środku nocy proces ten odbywa się w bardzo ograniczonym zakresie. Widoczne jest przesunięcie fazowe pomiędzy maksymalną temperaturą wewnętrzną, a temperaturą pomieszczenia. Temperatura w budynku waha się wokół maksymalnej temperatury warstwy zewnętrznej, a ta z kolei jest niewiele wyższa od temperatury otoczenia – (rys. 7.2.13c).

Ściana południowa w budynku nr 3 – (rys. 7.2.13d), na którą działa całkowite promieniowanie słoneczne, charakteryzuje się wyższą temperaturą w warstwie zewnętrznej i środkowej. Proces odbierania ciepła przez otoczenie z warstwy zewnętrznej przebiega bardziej intensywnie, niż przy ścianie północnej. O ile w ścianie północnej warstwa wewnętrzna oddawała ciepło do warstwy środkowej przez całą dobę, to w ścianie południowej proces ten zanika w godzinach popołudniowych i wieczornych. Widoczne jest przesunięcie fazowe pomiędzy maksymalną temperaturą warstwy wewnętrznej, a temperaturą pomieszczenia. Zjawisko to nie występuje w stropodachu, z racji obecności wełny mineralnej. Temperatura wewnętrzna jest wyższa przez całą dobę od temperatury warstwy wewnętrznej ścian. Zarówno stropodach budynku ocieplonego nr 4, który jest zaizolowany 20 cm wełny mineralnej, jak i przegroda północna i południowa, na swoich zewnętrznych powierzchniach mają bardzo wysoką temperaturę, w porównaniu z budynkiem nr 3.

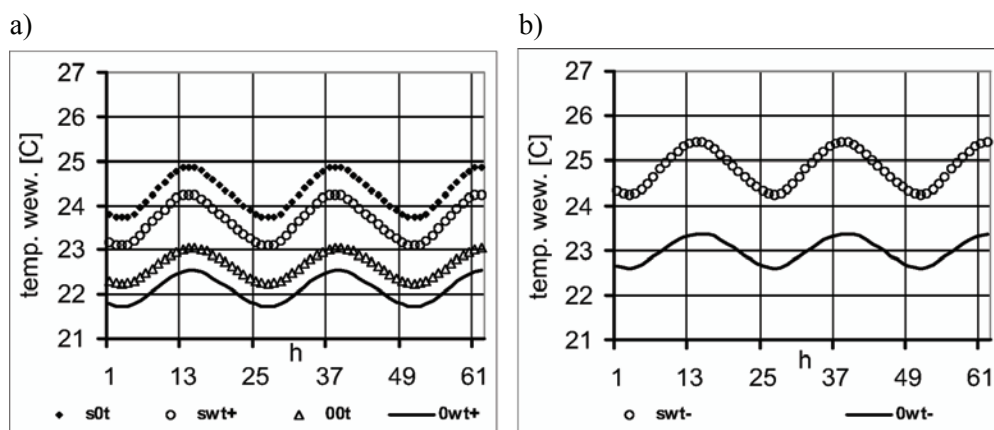
Rysunki 7.2.14 a, b, c i d dotyczą budynku nr 4 i są analogiczne do rysunków 7.2.13 a, b, c i d.

Z wykresów przedstawionych na rys. 7.2.14b, c i d wynika, że temperatury warstwy środkowej i wewnętrznej pokrywają się z temperaturą wewnętrzną. Proces wymiany ciepła przez ściany odbywa się okresowo i w bardzo ograniczonym zakresie. Przegrody budynku ocieplonego składają się, w swoich wewnętrznych warstwach, z cegły i przemienny proces wymiany ciepła pomiędzy przegrodą, a wnętrzem budynku ogranicza się do ceglanych warstw przegrody. Proces odprowadzenia ciepła z wnętrza budynku, przy dużym oporze warstw materiału izolacyjnego, jest bardzo skutecznie ograniczany. Nadmiar ciepła może być usuwany jedynie poprzez wzmożoną wymianę powietrza wentylacyjnego.

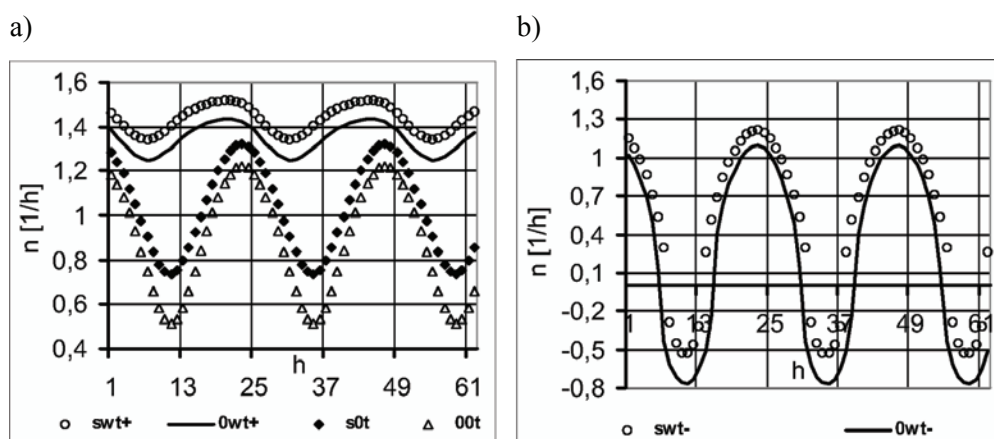
#### 7.2.1.c. Budynek nr 5

Wyniki obliczeń, które odnoszą się do budynku nr 5 – (tablica 6.1) pokazują rys. 7.2.15 i rys. 7.2.16. Dom zbudowany z bali drewnianych należy zakwalifikować jako energooszczędny, gdyż w styczniu średnia moc źródła ciepła potrzebna do pokrycia strat ciepła wynosi 2000 W i jest niewiele większa niż w budynku nr 4 po

docieplenię przegród zewnętrznych. Średnie zapotrzebowanie mocy w budynku zaizolowanym cieplnie wynosi 1700 W.

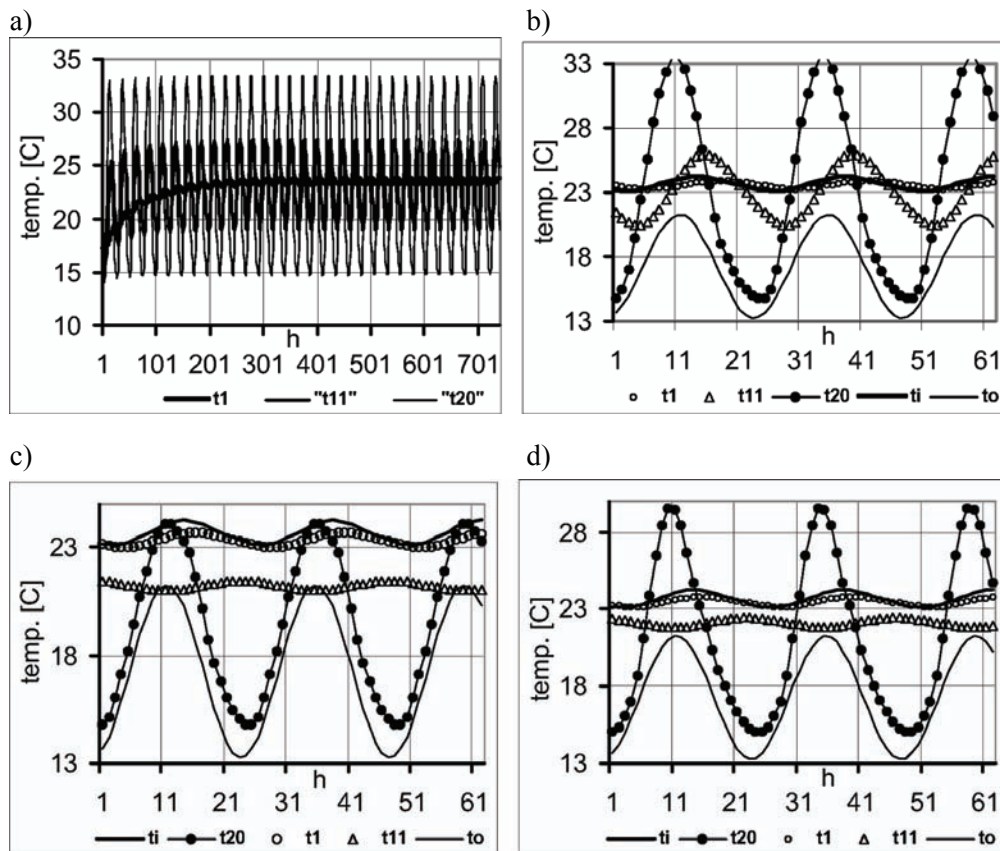


Rys. 7.2.15. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej w lipcu, w budynku nr 5, przy wietrze: a) wspomagającym, b) przeciwnym



Rys. 7.2.16. Liczba wymian powietrza wentylacyjnego w budynku nr 5, przy wietrze: a) wspomagającym, b) przeciwnym

Najkorzystniejsze warunki termiczne panują w budynku nr 5 przy wietrze wspomagającym i braku promieniowania bezpośredniego – (0wt); (rys. 7.2.15a). Podobnie jest przy wymuszeniu (00t), ale wówczas występuje bardzo poważny spadek ilości wymienianego powietrza w godzinach południowych. Brak wiatru, jak zwykle, osłabia przepływ w pomieszczeniu – (rys. 7.2.15b). Temperatura wewnętrzna przy braku wiatru – (s0t), która jest temperaturą najwyższą, osiąganą przy przyjętych założeniach, góruje nad temperaturą wewnętrzną, występującą w tych samych warunkach w budynku nr 1 i nr 3 – (rys. 7.2.2a) i (rys. 7.2.9a). Jest za to niższa, niż w obiekcie nr 2 i nr 4 – (rys. 7.2.2b) i (rys. 7.2.9b).



Rys. 7.2.17. Lipiec. Wymuszenie swt+. Budynek nr 5. Temperatury w pierwszej, środkowej i ostatniej zewnętrznej warstwie: a) stropodach – przebieg miesięczny, przebiegi dobowe: b) stropodachu, c) ściany północnej, d) ściany południowej

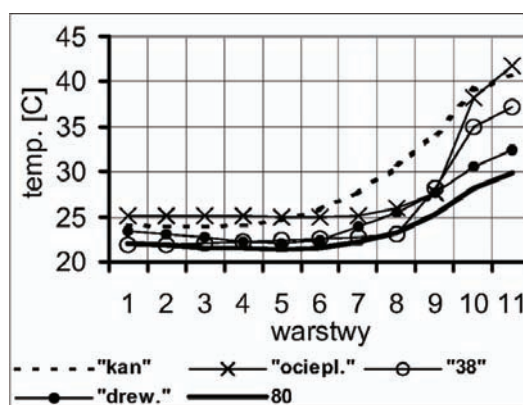
Przy wietrze przeciwnym i całkowitym promieniowaniu słonecznym budynek nr 5 jest przegrzany – (rys. 7.2.15b). Przepływ odwrotny występuje w czasie godzin dziennych – (rys. 7.2.16b).

Tak jak przy powyżej analizowanych typach budynków, rys. 7.2.17a pokazuje dobowe przebiegi temperatury w warstwach stropu. W porównaniu np. z budynkami nr 3 i nr 4 – (rys. 7.2.13a) i (rys. 7.2.14a) wahania temperatury warstwy środkowej są w obiekcie drewnianym wyższe. Strop zaizolowany polepą tworzy przegrodę o niższym oporze przenikania ciepła, niż przy wełnie mineralnej. Stąd też wahania warstwy środkowej bywają wyższe, niż w obu wymienianych budynkach, których stropy są – w mniejszym lub większym stopniu – izolowane właśnie wełną mineralną – (rys. 7.2.13b).

Ściana północna w ciągu dnia pobiera ciepło z wnętrza budynku, podczas gdy w godzinach nocnych proces ten ustaje na skutek braku różnicy temperatur. Zewnątrz warstwa ściany przez całą dobę, ale z różną intensywnością, oddaje ciepło do otoczenia – (rys. 7.2.13c). Przy ścianie południowej widać wyraźnie, w wa-

haniu temperatur warstwy zewnętrznej i środkowej, wpływ całkowitego promieniowania słonecznego – (rys. 7.2.13d).

Rysunek 7.2.18 przedstawia temperaturę w kolejnych warstwach stropodachu budynków nr 1–5. Wybrana dowolnie godzina obliczeń odpowiada godzinie 20. Temperatura otoczenia wynosi wówczas  $17,55^{\circ}\text{C}$ . Stropodachy, ocieplane materiałem izolacyjnym, mają o wiele wyższą temperaturę, szczególnie w zewnętrznych warstwach materiału, niż stropodach budynku nr 1. Pokrycie zewnętrzne stropodachów jest jednakowe.

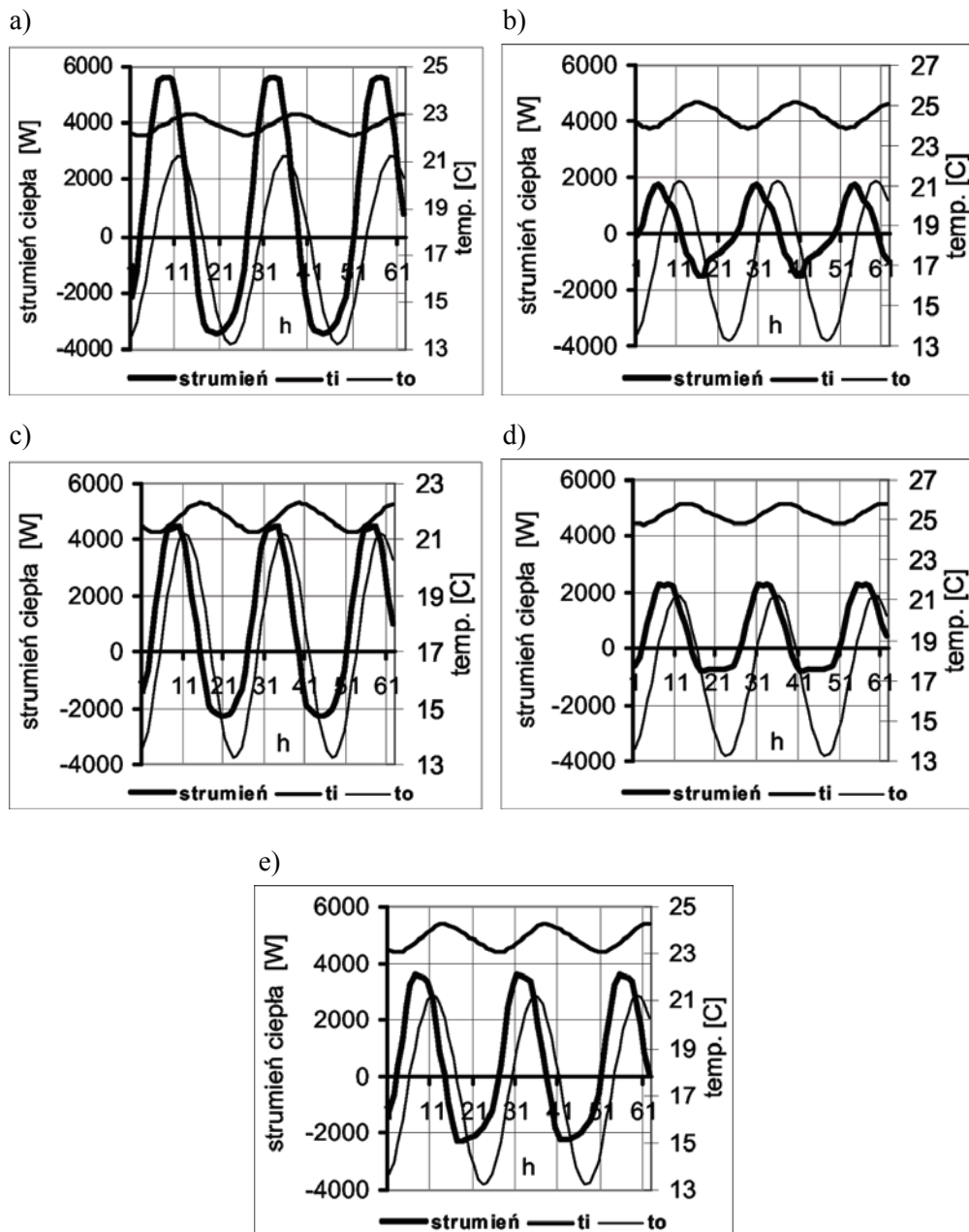


Rys. 7.2.18. Lipiec. Przebieg temperatury po grubości stropodachów w badanych budynkach, przy wymuszeniu swt, w 740 godzinie obliczeń

### 7.2.2. Całkowita akumulacja ciepła w budynkach nr 1–5

Wykresy na rys. 7.2.19 i rys. 7.2.20 przedstawiają przebiegi strumienia ciepła akumulowanego we wszystkich pięciu badanych obiektach, przy wymuszeniu (swt+) i (0wt+). Wahania dobowe mocy cieplnej, zgromadzonej w przegrodach budynków przy całkowitym promieniowaniu słonecznym, wykazują dużą niesymetryczność pomiędzy dniem i nocą. Przy promieniowaniu rozproszonym dysproporcja w dobowych waniach jest mniejsza. Wartość mocy zakumulowanego w tym przypadku strumienia ciepła jest niższa z racji mniejszej różnicy temperatur, pomiędzy kolejnymi warstwami materiału, szczególnie po stronie zewnętrznej przegrody. Z obliczeń wynika, że całkowity brak oddziaływania promieniowania słonecznego na budynek niweluje te dysproporcje.

Budynek nr 3, którego grubość ścian wynosi 38 cm i jest ponad dwukrotnie mniejsza od ściany budynku ciężkiego, ma dość dużą zdolność gromadzenia ciepła w swoich przegrodach – (rys. 7.2.19a i rys. 7.2.19c). Dlatego też ten bufor ciepła zupełnie dobrze wyrównuje temperaturę we wnętrzu budynku. Budynek wykonany z drewna ma niewiele mniejszą akumulację od budynku nr 3. Przegroda ta tłumia oddziaływanie słońca w takim samym stopniu, jak przegroda budynku nr 4 – (rys. 7.2.19a, c, e oraz rys. 7.2.20a, c, e).



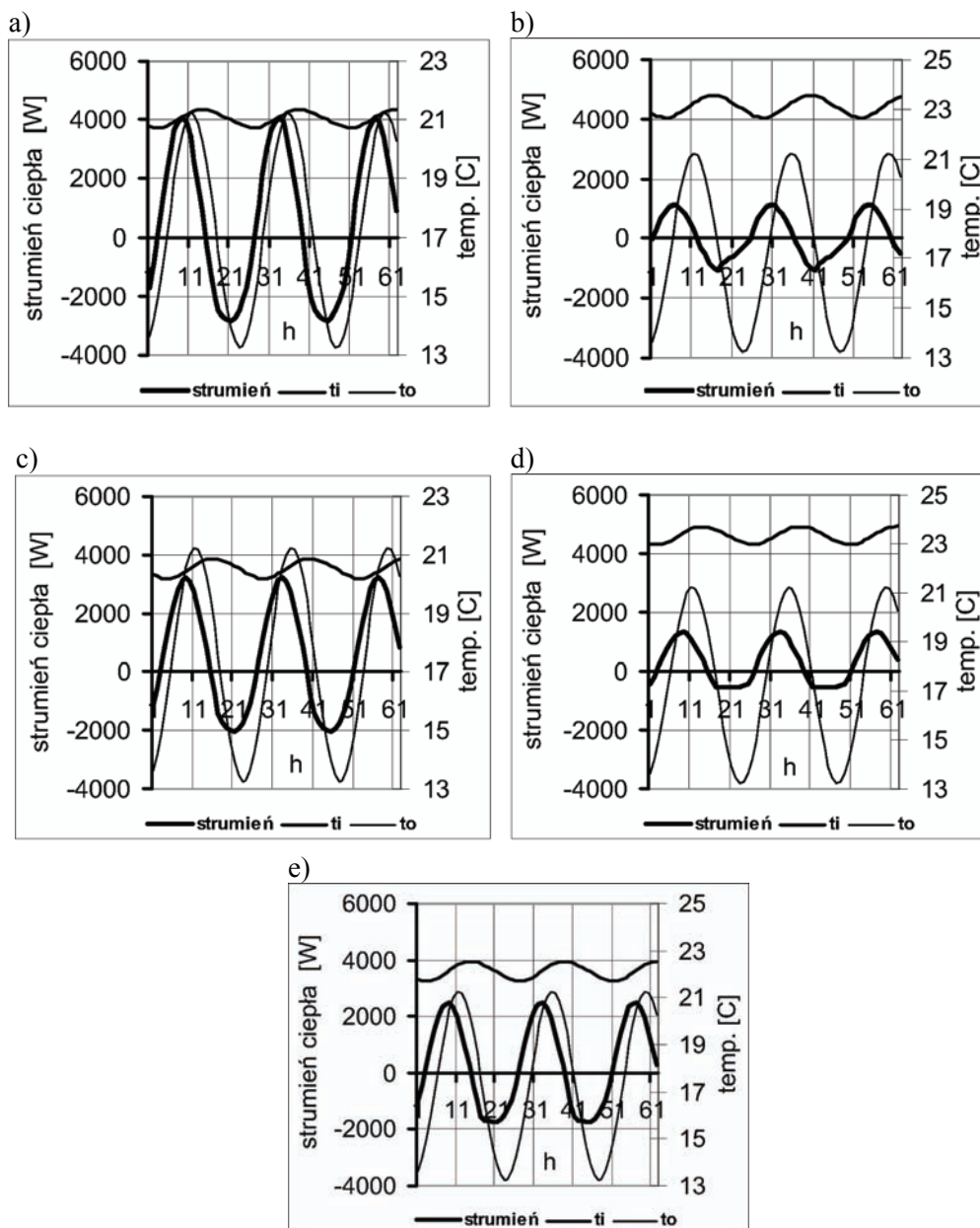
Rys. 7.2.19. Przebiegi dobowe strumienia ciepła, przy wymuszeniu swt+ w lipcu, akumulowanego w budynkach:

a) nr 1, b) nr 2, c) nr 3, d) nr 4, e) nr 5

Budynek nr 4 wykazuje podobną zdolność do akumulacji ciepła w swoich przegrodach jak budynek o konstrukcji szkieletowej, w którym udział materiału izolacyjnego, w ogólnej masie budynku, jest dużo wyższy, niż w budynku nr 4.

Wyraźne jest przesunięcie maksimum i minimum parametru – w stosunku do budynków wzniesionych z cegły.

Przebiegi strumienia ciepła, przy braku promieniowania bezpośredniego w wszystkich badanych obiektach budowlanych, przedstawione na wykresach rys. 7.2.20a, b, c, d, charakteryzują się większą symetrią pomiędzy dniem i nocą.



Rys. 7.2.20. Przebiegi dobowe strumienia ciepła w lipcu przy wymuszeniu  $0w_{t+}$ , akumulowanego w budynkach: a) nr 1, b) nr 2, c) nr 3, d) nr 4, e) nr 5

Tablica 7.2.1. Ekstremalne, dobowe wartości temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza wentylacyjnego, w budynkach jednostrefowych nr 1– nr 5, przy wymuszeniu wiatrem wspomagającym (+) w lipcu

| nr b.    | swt +               |                        | s0t                 |                        |
|----------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|
|          | T <sub>i</sub> [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] | T <sub>i</sub> [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] |
| <b>1</b> | 22,1–23,0           | 1,28–1,46              | 22,5–23,3           | 0,55–1,24              |
| <b>2</b> | 23,9–25,1           | 1,39–1,57              | 24,8–26,1           | 0,86–1,40              |
| <b>3</b> | 21,3–22,3           | 1,22–1,42              | 21,6–22,6           | 0,43–1,19              |
| <b>4</b> | 24,8–25,8           | 1,44–1,60              | 25,8–26,6           | 0,91–1,48              |
| <b>5</b> | 23,1–24,2           | 1,35–1,51              | 23,7–24,9           | 0,74–1,32              |
| nr b.    | 0wt +               |                        | 00t                 |                        |
|          | T <sub>i</sub> [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] | T <sub>i</sub> [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] |
| <b>1</b> | 20,7–21,3           | 1,18–1,37              | 21,0–21,6           | 0,21–1,13              |
| <b>2</b> | 22,7–23,6           | 1,31–1,50              | 23,5–24,4           | 0,67–1,31              |
| <b>3</b> | 20,2–20,9           | 1,14–1,36              | 20,4–21,0           | -0,26–1,09             |
| <b>4</b> | 23,0–23,7           | 1,33–1,50              | 23,7–24,4           | 0,71–1,30              |
| <b>5</b> | 21,7–22,5           | 1,26–1,44              | 22,2–23             | 0,53–1,22              |

Analiza przebiegów temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza wentylacyjnego, których wartości ekstremalne zawiera tablica 7.2.1, pozwala określić pewne relacje pomiędzy badanymi budynkami – (nr 1–nr 5). Chodzi tu oczywiście o relacje jakościowe, które będą zachowane także przy innych ustaleniach ale tych samych dla wszystkich budynków, a będą one dotyczyć: lokalizacji, warunków eksploatacyjnych, stosunku powierzchni przegród przezroczystych i nieprzezroczystych, powierzchni otworów wentylacyjnych itd.

Najkorzystniejszy mikroklimat w okresie letnim, przy obu kierunkach napływu wiatru, panuje w budynkach wykonanych z materiałów o dużej gęstości, a więc w budynkach nr 1 i nr 3. Przy przyjętych założeniach konstrukcyjnych i eksploatacyjnych temperatura w budynku nr 1 waha się od 20,7°C do 23,3°C, z amplitudą od 0,5°C do 1°C.

Poprawne strumienie objętości powietrza wentylacyjnego gwarantuje wiatr wspomagający. Brak zarówno słońca, jak i wiatru, powoduje w budynku nr 1 poważny spadek przepływu powietrza. Budynek nr 3 zachowuje się podobnie, choć temperatury jego wnętrza są niższe z racji intensywniejszej wymiany ciepła przez przegrody. Ponadto brak wiatru i promieniowania słonecznego, powoduje okresową zmianę kierunku przepływu powietrza – przepływ odwrotny. Przy wietrze połu-



dniowym zjawisko to występuje we wszystkich budynkach – tablica 7.2.2. Natomiast w budynku nr 4, z wyodrębnioną 10 centymetrową warstwą styropianu, maksymalna temperatura osiąga wartość 26,6°C. Do dobrego funkcjonowania tego typu budynku pożądana jest intensywna wymiana powietrza oraz brak energetycznych zysków słonecznych. Budynek nr 2 także wymaga intensywniejszego odprowadzania ciepła z jego wnętrza. We wszystkich analizowanych budynkach obecność wiatru jest czynnikiem niezbędnym do wyrównanego przebiegu wymiany powietrza wentylacyjnego.

Tablica 7.2.2. Ekstremalne, dobowe wartości temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza wentylacyjnego, w budynkach jednostrefowych nr 1– nr 5, przy wymuszeniu wiatrem przeciwnym (–)

| nr<br>bud. | swt –      |                          | 0wt –      |                          |
|------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|
|            | $T_i$ [°C] | $n$ [w·h <sup>-1</sup> ] | $T_i$ [°C] | $n$ [w·h <sup>-1</sup> ] |
| 1          | 22,7–23,6  | (–0,71) – 1,10           | 21,2–21,6  | (–0,89) – 0,98           |
| 2          | 25,7–27,1  | (–0,25) – 1,32           | 24,2–25,1  | (–0,59) – 1,32           |
| 3          | 21,9–22,7  | (–0,85) – 1,04           | 20,6–21,1  | (–0,97) – 0,91           |
| 4          | 26,3–27,4  | 0,22– 1,34               | 24,2–25,0  | (–0,58) – 1,20           |
| 5          | 24,3–25,4  | (–0,52) – 1,21           | 22,6–23,4  | (–0,77) – 1,09           |

Budynek nr 5 stwarza przyjazny mikroklimat przy braku promieniowania bezpośredniego, ale w obecności wiatru wspomagającego.

W sumie zaobserwowano niewielki wpływ wewnętrznej masy akumulacyjnej na założonej pojemności cieplnej na rozkład temperatur w budynku, a w budynku nr 1 – znikomy. W budynkach pozbawionych tej masy temperatury dzienne są niższe od 0,2°C w budynku nr1, do 0,5°C w budynku nr 2, a nocne – wyższe w podobnym zakresie. Wyniki obliczeń uzyskano przy uśrednionych miesięcznych parametrach pogodowych. W przypadku temperatury otoczenia, w powszechnym odczuciu, wydaje się ona być zbyt niska, bo jej maksymalna wartość o godz. 14<sup>30</sup> wynosi zaledwie 21,28°C. Ponadto, z uwagi na pozyskiwanie promieniowania słonecznego, przyjęto niezbyt duże okna o powierzchni 18% powierzchni podłogi stąd i strumień ciepła akumulowanego w ścianach wewnętrznych jest niewielki.

Wiatr napływający od południa, który tłumi przepływ powietrza, zmienia diametralnie warunki cieplno-przepływowe w obiekcie. Temperatura w budynku nr 2 i nr 4 z wyodrębnionym materiałem izolacyjnym, wzrasta jeszcze o 2°C i 1,5°C, podczas gdy w budynku nr 1 jest w dalszym ciągu na akceptowanym poziomie. Za to wymiana powietrza wentylacyjnego wymaga wsparcia systemu mechanicznego lub zwiększenia otworów wentylacyjnych.

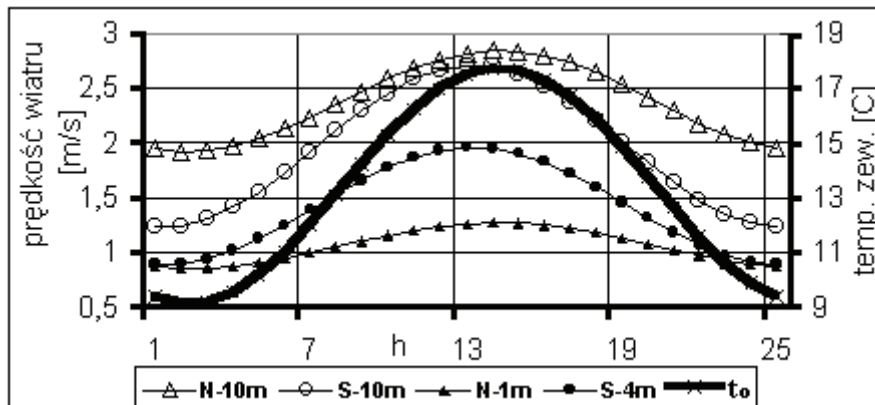
Analiza wyników pozwala różnicować jakościowo wpływ oddziaływań klimatycznych na procesy cieplno-przepływowe, w obiektach o różnej strukturze materiałowej przegród zewnętrznych. Umożliwia także badanie dynamiki tych procesów,

a informacje uzyskane z jej przebiegu powinny służyć poprawności wykonania projektu architektonicznego.

### 7.2.3. Nieustalona wymiana ciepła i powietrza w budynku w maju i wrześniu

W celu rozszerzenia materiału porównawczego przeprowadzono dodatkowo symulacje numeryczne procesów ciepłno-przepływowych w maju i wrześniu, w najczęściej występujących budynkach tj. nr 2 i 4. Maj jest pierwszym, a wrzesień ostatnim miesiącem poza sezonem grzewczym. Zyski energetyczne, absorbowane przez obiekt w tych miesiącach pochodzą, podobnie jak w lipcu, ze stałych, niezależnie od pory roku, wewnętrznych źródeł ciepła o mocy 300 W oraz z całkowitego lub tylko rozproszonego promieniowania słonecznego. Zyski słoneczne, docierające za pośrednictwem okien w maju, są najwyższe z racji optymalnego ustawienia słońca, sumy godzinowe, zbierane na powierzchnię równoległą do powierzchni ziemi, są niemal  $4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  większe niż w kwietniu, a tylko  $0,38 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  mniejsze niż w lipcu. Współczynnik jasności promieniowania całkowitego osiąga wartość wyższą niż w kwietniu i lipcu i wynosi 0,46, podczas gdy współczynnik promieniowania rozproszonego nie zmienia się. Jego wartość jest identyczna w okresie od marca do lipca i wynosi 0,22. We wrześniu zaś, zyski energetyczne otrzymywane przez obiekt są o około 60% niższe, niż w lipcu i maju. Współczynnik jasności promieniowania całkowitego spada do 0,37, a rozproszonego – do 0,19. Natomiast udział promieniowania rozproszonego w całkowitym – wzrasta – (tablica 6.6).

Wartość średnia temperatury otoczenia w maju jest podobna do września, ale wyższa ponad  $7^\circ\text{C}$ , niż w kwietniu oraz około  $4^\circ\text{C}$  niższa, niż w lipcu – (tablica 6.4).



Rys. 7.2.21. Dobowe wahania temperatury i prędkości wiatru północnego – N i południowego – S, w Warszawie w maju

Mimo, że sumy dobowe promieniowania słonecznego na przegrody pionowe w maju są nieco wyższe niż w lipcu, to jednak nie równoważą one ubytków ciepła, spowodowanych niższą temperaturą otoczenia. Prędkości wiatrów, a więc i spadek

ciśnienie, generowany ich oddziaływaniem na budynek, jest bardzo zbliżony w obu miesiącach do siebie. Składowa normalna wiatru północnego wytwarza w maju nieco większy spadek ciśnienia pomiędzy otworami wentylacyjnymi, ponieważ jej prędkość jest nieco wyższa, niż w lipcu. Natomiast wiatr południowy tłumi skuteczniej przepływ powietrza przez budynek w maju, niż w lipcu, ponieważ jego prędkość jest wyższa. W maju zredukowano o 25%, w stosunku do lipca, powierzchnię otworów wentylacyjnych.

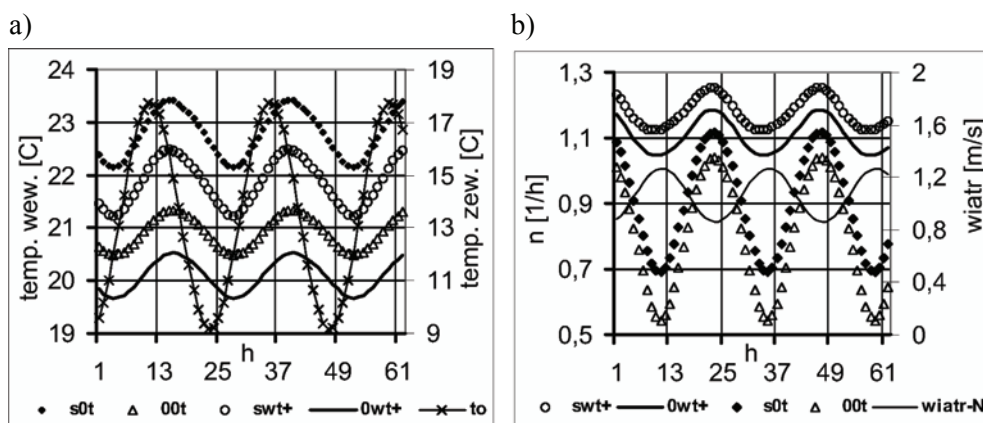
Prezentowane są jedynie wyniki symulacji numerycznych, przeprowadzanych z wiatrem północnym, wspomagającym. Zbiórce wyniki zamieszczono w tablicy 7.2.3.

Tablica 7.2.3. Ekstremalne, dobowe wartości temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza wentylacyjnego, w budynku jednostrefowym, przy wymuszeniu wiatrem wspomagającym (+) w maju

| nr<br>b. | swt +      |                        | s0t        |                        |
|----------|------------|------------------------|------------|------------------------|
|          | $T_i$ [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] | $T_i$ [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] |
| 2        | 21,2–22,4  | 1,12–1,25              | 22,2–23,4  | 0,70–1,12              |
| 4        | 22,0–23,0  | 1,16–1,26              | 22,8–23,8  | 0,74–1,13              |

| nr<br>b. | 0wt +      |                        | 00t        |                        |
|----------|------------|------------------------|------------|------------------------|
|          | $T_i$ [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] | $T_i$ [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] |
| 2        | 19,7–20,5  | 1,05–1,19              | 20,5–21,3  | 0,54–1,03              |
| 4        | 19,8–20,4  | 1,05–1,18              | 20,4–21,1  | 0,55–1,03              |

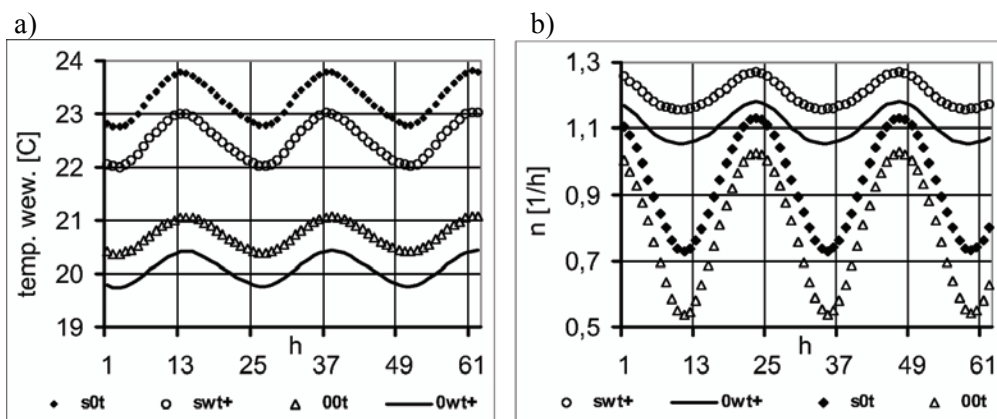
Rysunki 7.2.22, 7.2.23 przedstawiają przebiegi dobowe temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza w maju.



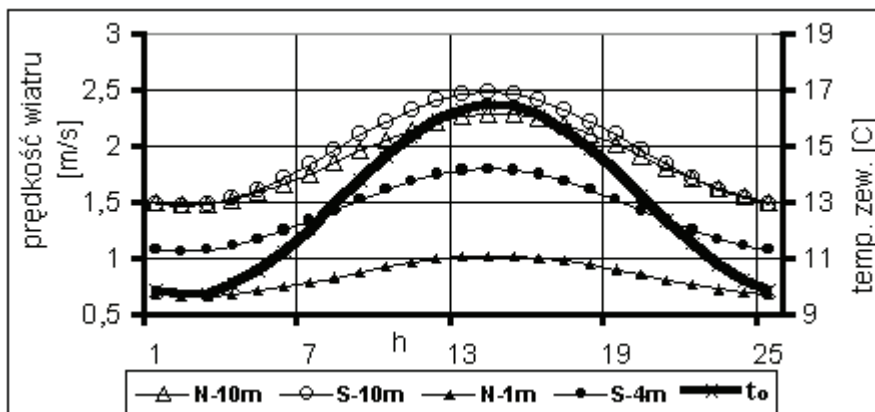
Rys. 7.2.22. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza w budynku nr 2

W budynku nr 2 – (rys. 7.2.22) panują częściowo warunki do zaakceptowania. Wzrost powierzchni otworów, w stosunku do wielkości otworów używanej w lipcu, spowoduje obniżkę temperatury przy wymuszeniu s0t i swt. Natomiast, przy braku promieniowania bezpośredniego, być może niektórzy użytkownicy zdecydują się na zwiększenie mocy źródła ciepła.

Budynek nr 4 – (rys. 7.2.23) jest w dalszym ciągu budynkiem przegrzany, szczególnie w obecności promieniowania bezpośredniego. Zwiększenie powierzchni otworów wentylacyjnych, przy braku wiatru i częściowym zacienieniu okien, pozwoli obniżyć temperaturę w pomieszczeniu.

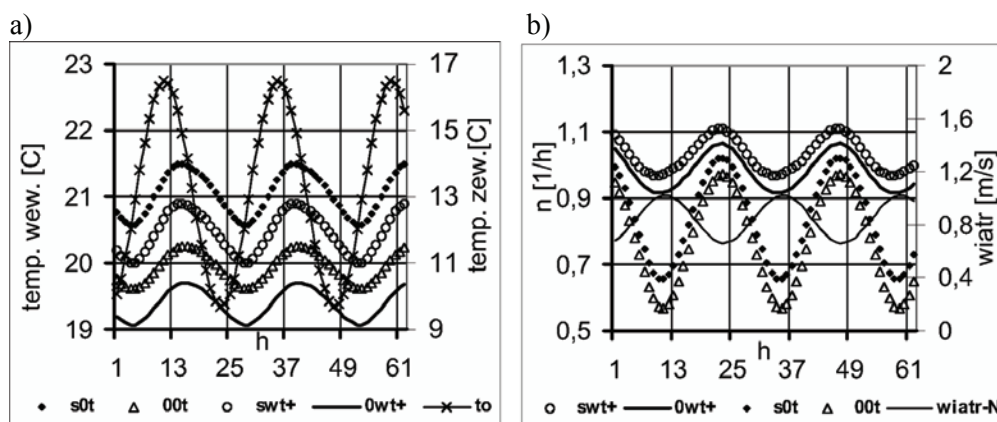


Rys. 7.2.23. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza w budynku nr 4

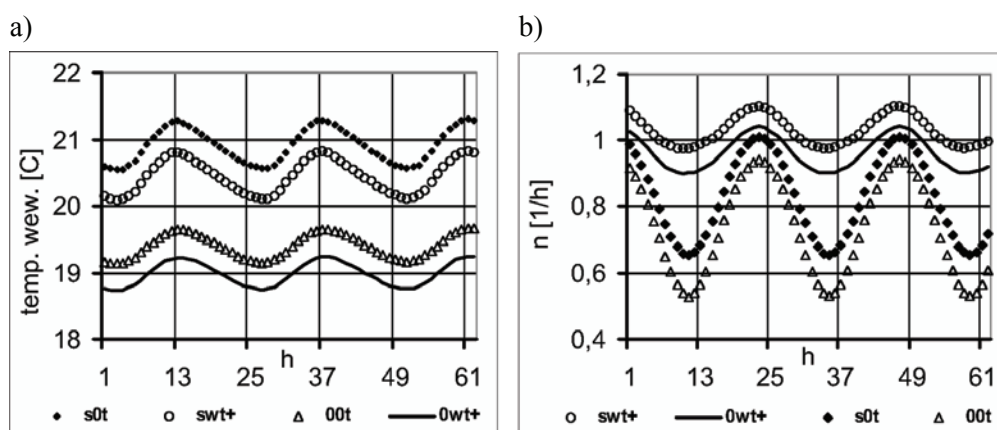


Rys. 7.2.24. Dobowe wahania temperatury i prędkości wiatru północnego – N i południowego – S, w Warszawie we wrześniu

Wykresy na rysunkach od 7.2.25 do 7.2.26 przedstawiają przebiegi dobowe temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza w budynkach nr 2 i nr 4, eksploatowanych we wrześniu. Podobnie, jak w maju, występuje jedynie wiatr wspomagający.



Rys. 7.2.25. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza w budynku nr 2



Rys. 7.2.26. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza w budynku nr 4

We wszystkich budynkach, przy braku promieniowania bezpośredniego, temperatury wewnętrzne są za niskie. Zyski, pochodzące z całkowitego promieniowania słonecznego nie podnoszą dostatecznie temperatury wewnętrznej. Przepływ powietrza wentylacyjnego natomiast, choć odbywa się przez tę samą powierzchnię otworów wentylacyjnych, co w maju, to charakteryzuje się niższą liczbą wymian. Energetyczne zyski słoneczne są we wrześniu niższe, a w związku z tym i wypór termiczny, który generuje przepływ powietrza, jest mniejszy.

Budynki nr 2 i nr 4, tak w maju, jak i we wrześniu – w sytuacjach, kiedy pozbawione są słonecznych zysków energetycznych z promieniowania bezpośredniego – wymagają dogrzewania. Ściany budynków dobrze zaizolowane cieplnie, o niskim stopniu absorpcji ciepła, skutecznie chronią pomieszczenie przed pozyskiwaniem ciepła z zewnątrz. Zyski energetyczne, dostarczane przez okna i moc wewnętrznych źródeł ciepła, są za niskie, by zapewnić akceptowaną przez użytkowników tempera-

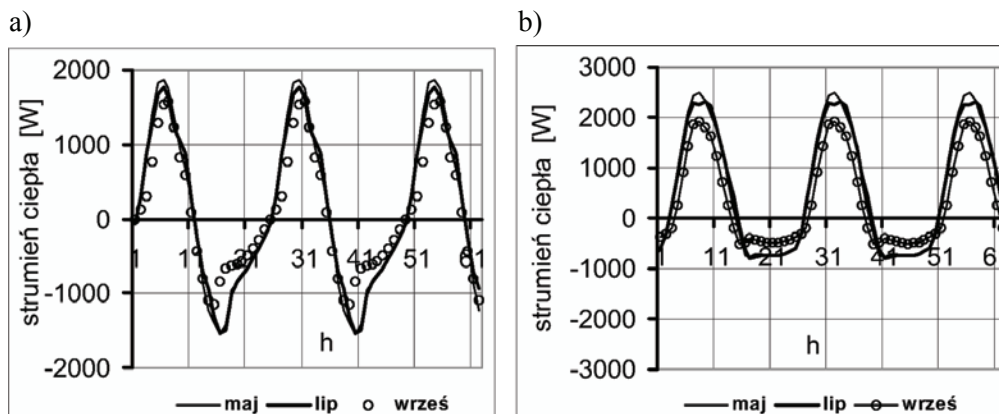
ture w pomieszczeniu. Zmniejszenie powierzchni otworów wentylacyjnych, szczególnie we wrześniu, spowoduje niedostateczny przepływ powietrza przez budynek. Tak pożądana w sezonie grzewczym cecha przegrody, charakteryzująca się wysokim oporem cieplnym, może prowadzić do jego przedłużenia.

Tablica 7.2.4 Ekstremalne, dobowe wartości temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza wentylacyjnego, w budynku jednostrefowym, przy wymuszeniu wiatrem wspomagającym (+), we wrześniu

| nr<br>b. | swt +      |                        | s0t        |                        |
|----------|------------|------------------------|------------|------------------------|
|          | $T_i$ [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] | $T_i$ [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] |
| 2        | 20,0–20,9  | 0,97–1,11              | 20,6–21,5  | 0,66–1,10              |
| 4        | 20,1–20,8  | 0,98–1,10              | 20,6–21,3  | 0,65–1,00              |

| nr<br>b. | 0wt +      |                        | 00t        |                        |
|----------|------------|------------------------|------------|------------------------|
|          | $T_i$ [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] | $T_i$ [°C] | n [w·h <sup>-1</sup> ] |
| 2        | 19,1–19,7  | 1,02–1,06              | 19,7–20,2  | 0,58–0,96              |
| 4        | 18,7–19,2  | 0,90–1,04              | 19,2–19,6  | 0,54–0,93              |

Rysunek 7.2.27, w celach porównawczych, przedstawia przebiegi strumienia ciepła akumulowanego w budynkach, w kolejnych miesiącach. Warunki pogodowe nie wpływają zasadniczo na to zjawisko. Choć w maju promieniowania słoneczne zaznacza swój nieco większy wpływ na proces, niż w lipcu. We wrześniu, który charakteryzuje się wydatnie mniejszymi słonecznymi zyskami energetycznymi, maksymalna wartość akumulacji ciepła w przegrodach jest najniższa.



Rys. 7.2.27. Dobowe przebiegi strumienia ciepła, przy wymuszeniu swt+ w maju, lipcu i wrześniu, akumulowanego w budynkach: a) nr 2, b) nr 4

#### 7.2.4. Podsumowanie

Prezentowane, w rozdziale 7.2, przebiegi temperatury wewnętrznej oraz strumienia objętości powietrza wentylacyjnego dotyczą budynków jednostrefowych – nr 1–5. Dane charakteryzujące badane obiekty zawiera tablica 6.1. Procesy ciepło-przepływowe symulowano numerycznie, przy pełnym wymuszeniu parametrów klimatu. W przeciwieństwie do założeń przyjętych w rozdziale 7.1, wszystkie badane obiekty mają jednakową powierzchnię i orientację okien oraz powierzchnię otworów wentylacyjnych. Stąd uzyskane wyniki pozwalają na ocenę wpływu struktury ścian na warunki cieplne, panujące w poszczególnych budynkach. Moc wewnętrznego źródła ciepła została zwiększona trzykrotnie, w stosunku do mocy przyjętej w symulacjach z rozdziału 7.1, co miało przeciwdziałać okresowym zmianom kierunku przepływu powietrza wentylacyjnego, przy braku wiatru i bezpośredniego promieniowania słonecznego.

We wszystkich analizowanych budynkach, obecność wiatru wspomagającego jest czynnikiem niezbędnym do wyrównanego przebiegu wymiany powietrza wentylacyjnego. Wiatr napływający od południa, który tłumi lub wręcz odwraca okresowo kierunek przepływu powietrza, pogarsza w obiekcie warunki ciepło-przepływowe.

Dodatkowe, w celu poszerzenia informacji, symulacje numeryczne przeprowadzone, w budynkach nr 2 i nr 4, w maju i wrześniu. Otrzymane wyniki obliczeń, a także wieloletnie obserwacje wskazują, że budynki tego typu, w miesiącach sąsiadujących z sezonem grzewczym, w niekorzystnych warunkach pogodowych, niesprzyjających warunkach lokalizacyjnych oraz przy małych energetycznych zyskach wewnętrznych, mogą wymagać dogrzewania. Tym samym wydłuża się wówczas sezon grzewczy i rosną koszty eksploatacji obiektu. Materiał stosowany do izolacji cieplnej skutecznie chroni, w każdej porze roku, przegrody obiektu przed absorpcją ciepła z otoczenia zewnętrznego.

W tablicach 7.2.1–7.2.4 zestawiono ekstremalne, pochodzące z przebiegów dziennych, wartości temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza wentylacyjnego, symulowane w kolejnych budynkach

Chociaż przedstawione w punkcie 7.2 rezultaty obliczeń są raczej natury jakościowej, to jednak pozwalają wyciągnąć wnioski, którymi powinni kierować się projektanci budynków o dużym oporze cieplnym zewnętrznych przegród nieprzezroczystych.

Projektant musi mieć na uwadze, że powierzchnie przeszklone tworzą z pomieszczeniem układ pasywny, który wykorzystuje w sposób bezpośredni energię promieniowania słonecznego. Energia ta pochłaniana jest i magazynowana we wnętrzu budynku. Przegrody pomieszczenia pozyskują energię promieniowania słonecznego i stają się źródłem promieniowania cieplnego. Część energii, w procesie przenikania, oddawana jest do otoczenia budynku. Skutki procesu konwersji promieniowania słonecznego zależą, jak pokazują chociażby wyniki przedstawionych badań, od struktury materiałowej ścian zewnętrznych i ich zdolności do akumulacji ciepła. Dlatego zarówno lokalizacja działki, jak i ukształtowanie terenu, jego zabudowa, wartości parametrów klimatu, w tym dostępność słonecznego promieniowa-

nia bezpośredniego, powinna determinować założenia projektu, w które włączone być musi także bezpośrednie otoczenie budynku. Jedną z cech budynku energooszczędnego powinna być satysfakcjonująca możliwość korzystania z wentylacji naturalnej, wspomaganej mechanicznie w szczególnie niedogodnych warunkach pogodowych.

W przypadku nowowznoszonego obiektu, jeśli projektant rozumie wszystkie zachodzące w budynku i jego obudowie zjawiska cieplno-przepływowe oraz wpływ środowiska zewnętrznego, to jego zadanie jest łatwiejsze, niż w przypadku budynku przeznaczanego do izolacji cieplnej. Niekorzystna bowiem lokalizacja budynku z punktu widzenia orientacji i powierzchni przegród itd., pozostaje także niekorzystna po dociepleniu. W tej sytuacji możliwa jest jedynie regulacja dostępu promieniowania słonecznego do przegród budynku także przez stosowanie selektywnych powłok okiennych [91]. Nie mniej nawet takich zaleceń w audycie energetycznym budynków wykonywanym na potrzeby ich termomodernizacji nie ma. Audyt skupia się na zabiegach prowadzących do obniżeniu sezonowego zapotrzebowania ciepła na cele grzewcze i strat na wentylację – (szczelne okna). Tak w audycie jak i w projekcie strumień objętości powietrza ustala się zgodnie z normą [95, 97]. Norma ta określa w sposób więcej niż pobieżny wymagania odnośnie wymiany powietrza w budynkach z wentylacją naturalną. Mimo, że wiedza o wentylacji naturalnej poszerzyła się bardzo znacznie to wspomniana norma pozostaje podstawową wytyczną projektową w tej dziedzinie [6]. Ponadto, jak podano w [34], oddziaływanie energii promieniowania słonecznego, liczone według kolejnej normy – [96], a wykorzystywane także w audycie jest bardzo uproszczone i nie oddaje charakteru zjawisk, zachodzących w budynku i jego otoczeniu.

Projekt wykonywany do audytu powinien zatem uwzględniać konsekwencje termomodernizacji budynku w tym także regulację dostępu promieniowania słonecznego, a także wspomaganie mechaniczne wentylacji naturalnej. Działania takie mogłyby uchronić budynek przed instalacją energochłonnych klimatyzatorów.

Zawsze nadrzędnym zadaniem projektanta powinno być stworzenie mieszkańcom optymalnych warunków bytowania w ciągu całego roku, tak z punktu widzenia bilansu cieplnego budynku, jak i maksymalnego wykorzystania możliwości, jakie stwarza wentylacja naturalna [7].

### 7.3. Nieustalony przepływ ciepła w obiektach dwustrefowych, przy pełnym wymuszeniu zewnętrznym

Bieżący rozdział dotyczy badania procesów cieplno-przepływowych w budynkach dwustrefowych – (nr 1–5), których dane wymiarowe i cieplne zamieszczono w tablicach 6.1–6.3. Widok obiektu przedstawia rys. 6.10. Strefa pierwsza i druga mają te same gabaryty, i kubatura każdej ze stref wynosi  $75 \text{ m}^3$ . Strefy łączy otwór znajdujący się w stropie pomiędzy kondygnacjami o powierzchni  $2 \text{ m}^2$ . W każdej ze stref znajdują się wewnętrzne źródła ciepła, o mocy po 300 W.

Lokalizacja dolnego otworu wentylacyjnego w strefie pierwszej, odpowiada tej z budynku jednostrefowego. Otwór górny, na który działa wiatr przeciwny, usytuowany jest w strefie drugiej, w ścianie południowej na wysokości 7 m nad pozio-



mem gruntu. Wartość składowych normalnych wiatru podaje tablica 6.5. Proces przepływu powietrza wentylacyjnego przez budynek dwustrefowy opisuje równanie (5.45). Wyniki symulacji numerycznych procesów ciepłno-przepływowych w budynkach dwustrefowych, przeprowadzono przy potrójnej – w stosunku do podstawowej – powierzchni otworów wentylacyjnych. Wyniki obliczeń dotyczą wyłącznie lipca.

Dodatkowo, w celu poszerzenia materiału porównawczego, symulowano procesy ciepłno-przepływowe w budynku nr 1, przy różnych strukturach materiałowych stropów wewnętrznych i stropodachów. Tablica 7.3.1 zawiera wyniki obliczeń dla budynku nr 1.

W budynku nr 1 symulacje przeprowadzono z udziałem następujących stropów:

- 1.a.** Stropodach jest stropem ciężkim, tak jak w budynku jednostrefowym, natomiast strop (sufit) wewnętrzny, o grubości 20 cm, jest stropem murowanym, ceglany, nosi wtedy nazwę stropu ciężkiego, wewnętrznego.
- 1.b.** Stropodach, zwany w opisie, stropem zewnętrznym, jest stropem ciężkim, tak jak w budynku jednostrefowym, natomiast strop wewnętrzny – lekkim, zwany w strefie pierwszej sufitem – warstwa 1, drugiej podłogą – warstwa 20. Strop ten ma grubość 20 cm oparty jest na belkach drewnianych, a składa się z płyty gipsowo-kartonowej, z wełny mineralnej i z desek. Nosi on nazwę stropu lekkiego.
- 1.c.** Stropodach i strop wewnętrzny są stropami lekkimi. Stropodach ma grubość 30 cm, a strop wewnętrzny (sufit) 20 cm.

W opisie rysunków posłużono się symbolami według punktu 6.4. W przypadku temperatur w warstwach stropów i wewnętrznych mas akumulacyjnych, przyjęto następujące oznaczenia:

- $t_{1\text{-strop}}, t_{20\text{-strop}}$  – temperatura pierwszej – (1) i ostatniej – (20) warstwy stropu (stropodachu),
- $t_{1\text{-sufit}}, t_{20\text{-sufit}}$  – temperatura pierwszej – (1) i ostatniej – (20) warstwy stropu wewnętrznego (warstwa pierwsza – sufit w strefie pierwszej, warstwa ostatnia (20) – podłoga w strefie drugiej),
- $t_{1\text{-śc.wew.}}, t_{20\text{-śc.wew.}}$  – temperatury pierwszej i ostatniej warstwy ściany wewnętrznej, znajdującej się w strefie pierwszej.

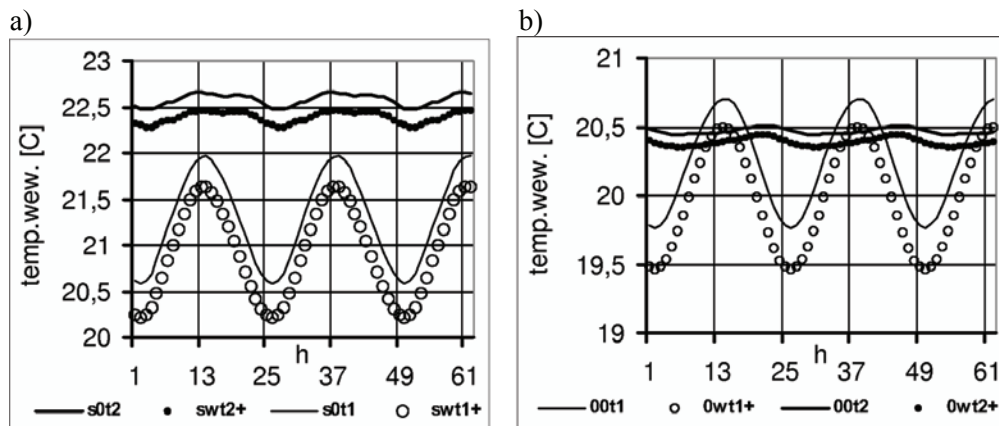
### 7.3.1. Budynek nr 1

**Ad. 1.b.** Wyniki symulacji numerycznych z rys. 7.3.1–7.3.5 przedstawiają przebiegi dobowe liczby wymian powietrza oraz temperatur w strefach budynku nr 1. Budynek ten wyposażony jest w stropy opisane w punkcie 1b, tzn. strop zewnętrzny – ciężki, sufit – lekki. Wpływ stropów wewnętrznych, tj. 1a i 1c na przebiegi temperatur omówiony jest w dalszej części 7.3.1, a wyniki obliczeń zawiera tablica 7.3.1.

Przy wskazanej w punkcie 1b strukturze materiałowej stropów oraz wymuszeniach (swt+) oraz (s0t) w strefie pierwszej, różnica pomiędzy temperaturą najwyższą, a najniższą wynosi około 1.2°C, podczas gdy w strefie drugiej różnica ta

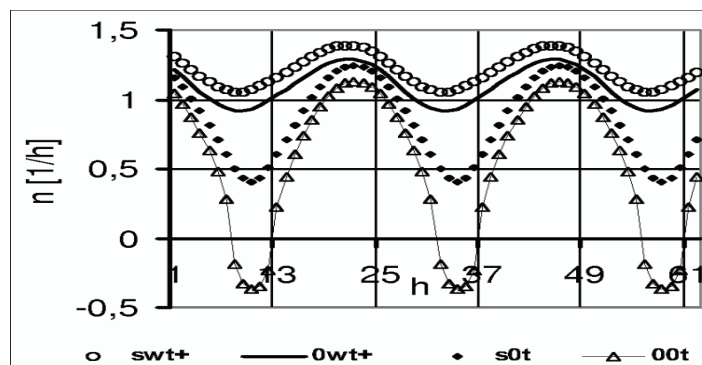
jest znikoma i nie przekracza  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Maksyma temperatur w obu strefach oddalone są od siebie o około 1 h. Brak bezpośredniego promieniowania słonecznego wpływa na wyrównanie temperatury w ciągu dnia – rys. 7.3.1b. W godzinach popołudniowych strefa pierwsza ma wyższą temperaturę, zarówno przy wymuszeniu (0wt) jak i (00t).

Wzrost przepływu powietrza przez budynek, przy wymuszeniu (swt) i (s0t), nie jest równomierny w ciągu doby. Wahania – (swt) sięgają wtedy  $0,5 \text{ w}\cdot\text{h}^{-1}$ , a brak wiatru – (s0t) zwiększa wahania strumienia do  $0,9 \text{ w}\cdot\text{h}^{-1}$  – (rys. 7.3.2).



Rys. 7.3.1. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$  budynku nr 1. Wymuszenie: a) swt+ i s0t, b) 0wt+ i 00t

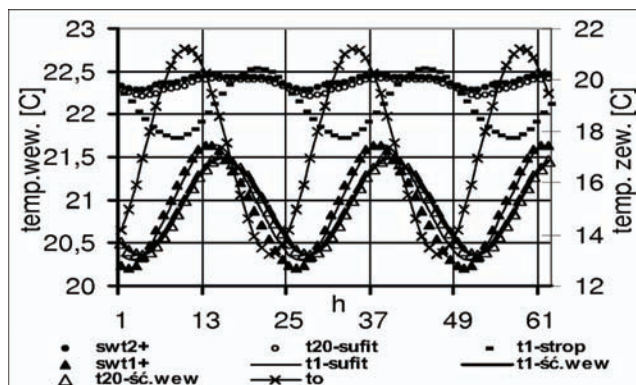
Prędkość wiatru północnego, na wysokości otworu wentylacyjnego, waha się w terenie zabudowanym od  $0,8$  do  $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Strumienie powietrza wentylacyjnego są w godzinach nocnych, w obu wypadkach, do siebie zbliżone. Wiatr ma wtedy prędkość ok.  $0,83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . W godzinach popołudniowych osiąga  $1,33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . W ciągu dnia brak działania wiatru – (s0t) powoduje średnio dwukrotny spadek wymiany powietrza, w porównaniu z – (swt).



Rys. 7.3.2. Dobowe przebiegi całkowitej liczby wymian powietrza (odpowiadają temperaturom z rys. 7.3.1a i rys. 7.3.1b)

Nieobecność promieniowania bezpośredniego wyrównuje i obniża temperaturę o około  $0,5\text{--}0,7^{\circ}\text{C}$  w obu strefach – (0wt) i (00t), (rys. 7.3.1b). Wymuszenie (00t) przynosi okresowo odwrócony kierunek przepływu powietrza, z racji wytworzonej odwrotnej relacji gęstości.

Wykresy na rys. 7.3.3 wskazują, że strop zewnętrzny ciężki pobiera przez większość doby ciepło ze strefy drugiej. Temperatura wewnętrzna w strefie drugiej jest minimalnie wyższa od temperatury podłogi ( $t_{20\text{sufit}}$ ). Oznacza to, iż mimo że strop wewnętrzny jest stropem lekkim, to jednak w bardzo niewielkim zakresie zachodzi proces pobierania ciepła przez podłogę. W strefie pierwszej temperatura pokrywa się w zasadzie z temperaturą sufitu i tylko ściana wewnętrzna pobiera, w niewielkim zakresie, ciepło z pomieszczenia. Widoczne jest przesunięcie maksimum obu temperatur. Analogicznie do budynku jednostrefowego, wewnętrzna masa akumulacyjna zlokalizowana w obu strefach, przy potężnej masie przegród zewnętrznych budynku, ma niewielki wpływ na przebieg temperatury wewnętrznej.

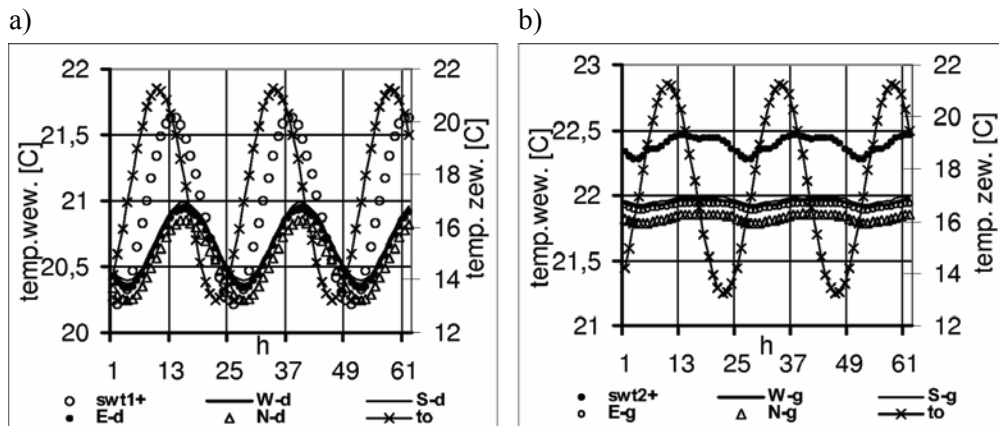


Rys. 7.3.3. Budynek nr 1. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi temperatury: w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , sufitu:  $t_{1\text{-sufit}}$  i  $t_{20\text{-sufit}}$ , ściany wewnętrznej –  $t_{1\text{-śc.wew}}$  i  $t_{20\text{-śc.wew}}$ , oraz stropodachu –  $t_{1\text{-strop}}$

Rysunek 7.3.4 pokazuje przebieg procesu pobierania ciepła przez ścianę zewnętrzną budynku. W strefie pierwszej proces ten przedstawia rys. 7.3.4a, a w drugiej – rys. 7.3.4b. Temperatury przegród pionowych, w poszczególnych strefach, są do siebie zbliżone. Różnice, które występują pomiędzy nimi, wynikają z wartości sum dobowego promieniowania słonecznego, padającego na te przegrody. Proces wymiany ciepła w każdej ze stref ma inny charakter. W strefie pierwszej pobieranie ciepła z wnętrza obiektu występuje najintensywniej w godzinach dziennych. W godzinach nocnych sytuacja się odwraca, ale zachodzi w dużo mniejszym zakresie. W strefie drugiej wnętrze budynku oddaje ciepło przegrodom przez całą dobę.

Efektem działania wiatru południowego jest nieznaczny wzrost temperatury w strefach – (rys. 7.3.5a) i niemal symetryczne, w stosunku do godzin nocnych, odwrócenie kierunku przepływu powietrza wentylacyjnego w ciągu dnia – (rys. 7.3.5b). Temperatury w strefie górnej mają podobnie jak przy wietrze wspoma-

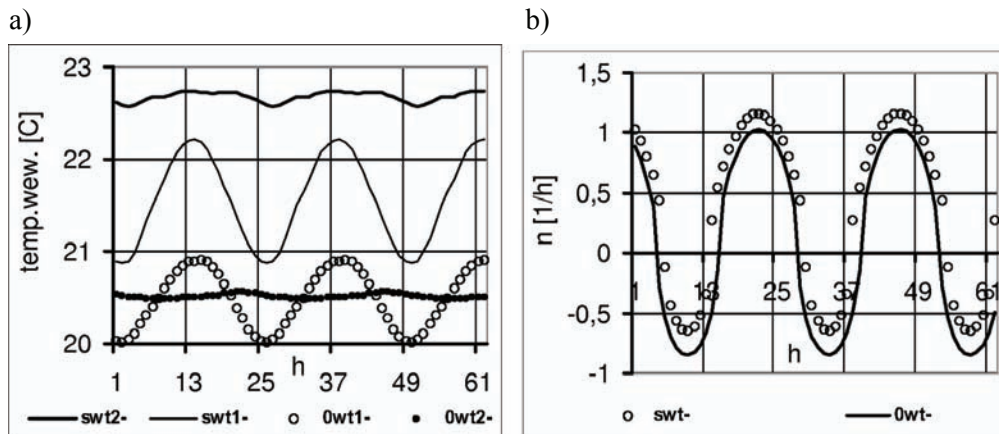
gającym, mniejszą amplitudę, niż w strefie dolnej – z racji ciężkiego stropu o dużej pojemności cieplnej. W godzinach południowych, kiedy temperatura w pomieszczeniu jest niższa od temperatury otoczenia, deficyt gęstości powietrza wspomaga działanie wiatru południowego pogłębiając występowanie przepływu odwrotnego.



Rys. 7.3.4. Budynek nr 1. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej oraz w wewnętrznej warstwie ścian o orientacji: W, S, E, N.

Strefa: a) pierwsza, b) druga

Ad. 1.a. Zamiana stropu wewnętrznego z lekkiego na ciężki, przy istniejącym ciężkim stropie zewnętrznym i ścianach zewnętrznych o dużej pojemności cieplnej, nie ma dużego wpływu na temperaturę w strefie drugiej. W strefie pierwszej temperatury są niższe. Dodatkowo, temperatury w strefie pierwszej, w ciągu godzin dziennych, w szerszym zakresie, przewyższają temperatury w strefie drugiej.



Rys. 7.3.5. Budynek nr 1. Wymuszenie swt- i 0wt-. Dobowe przebiegi

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ ,

b) liczby wymian powietrza wentylacyjnego

Temperatura wewnętrznej i ostatniej warstwy stropu wewnętrznego, przy tej samej strukturze materiałowej obu stropów, ma odmienny przebieg, niż przy suficie – stropu lekkiego. Temperatura stropu wewnętrznego, w strefie pierwszej, jest dużo niższa od temperatury wnętrza, zachodzi więc proces oddawania ciepła do stropu, stąd i temperatury wewnętrzne – (swt) i (s0t) są w tym przypadku niższe. Obecnie sufit w strefie pierwszej odbiera ciepło z pomieszczenia przez większą część doby.

Przy braku promieniowania bezpośredniego, wymiana ciepła pomiędzy stropem wewnętrznym i wnętrzem pomieszczenia nie jest intensywna. W godzinach popołudniowych proces zanika, natomiast strop zewnętrzny, z różną intensywnością, pobiera ciepło przez całą dobę. W strefie pierwszej ciepło z pomieszczenia pobiera strop wewnętrzny. Zamiana stropu wewnętrznego lekkiego na ciężki zintensyfikowała wymianę ciepła z przegrodami poziomymi. Efekt tego procesu widoczny jest w zmienionych nieco wartościach i charakterze temperatur w strefach. Występuje większe przesunięcie pomiędzy osiąganymi ekstremami obu temperatur, szczególnie przy wymuszeniu (swt).

Tablica 7.3.1. Wartości ekstremalne temperatur w obu strefach budynku nr 1, przy stropach o różnej pojemności cieplnej. Wymuszenie wiatrem wspomagającym (+) oraz przeciwnym (-)

| stropy                     | 1a        | 1b        | 1c        |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>swt +</b>               |           |           |           |
| <b>T<sub>i1</sub> [°C]</b> | 20,2–21,6 | 21,0–22,4 | 20,3–21,7 |
| <b>T<sub>i2</sub> [°C]</b> | 22,3–22,5 | 22,3–22,4 | 23,2–23,9 |
| <b>swt –</b>               |           |           |           |
| <b>T<sub>i1</sub> [°C]</b> | 20,9–22,2 | 21,5–22,7 | 21,0–22,3 |
| <b>T<sub>i2</sub> [°C]</b> | 22,6–22,7 | 22,5–22,7 | 24,0–24,8 |
| <b>s0t</b>                 |           |           |           |
| <b>T<sub>i1</sub> [°C]</b> | 20,6–22,0 | 21,6–22,4 | 20,7–22,1 |
| <b>T<sub>i2</sub> [°C]</b> | 22,5–22,7 | 22,4–22,6 | 23,7–24,3 |
| <b>0wt +</b>               |           |           |           |
| <b>T<sub>i1</sub> [°C]</b> | 19,7–20,6 | 19,7–20,7 | 19,6–20,6 |
| <b>T<sub>i2</sub> [°C]</b> | 20,3–20,4 | 20,3–20,4 | 21,8–22,0 |
| <b>0wt –</b>               |           |           |           |
| <b>T<sub>i1</sub> [°C]</b> | 20,0–20,9 | 20,1–20,8 | 20,0–21,0 |
| <b>T<sub>i2</sub> [°C]</b> | 20,5–20,6 | 20,5–20,6 | 22,2–22,6 |
| <b>00t</b>                 |           |           |           |
| <b>T<sub>i1</sub> [°C]</b> | 19,9–20,7 | 19,9–20,7 | 19,9–20,8 |
| <b>T<sub>i2</sub> [°C]</b> | 20,4–20,5 | 20,4–20,5 | 22,1–22,4 |

Wariant: 1.a, 1.b, 1.c według opisu zamieszczonego w punkcie 7.3.1.

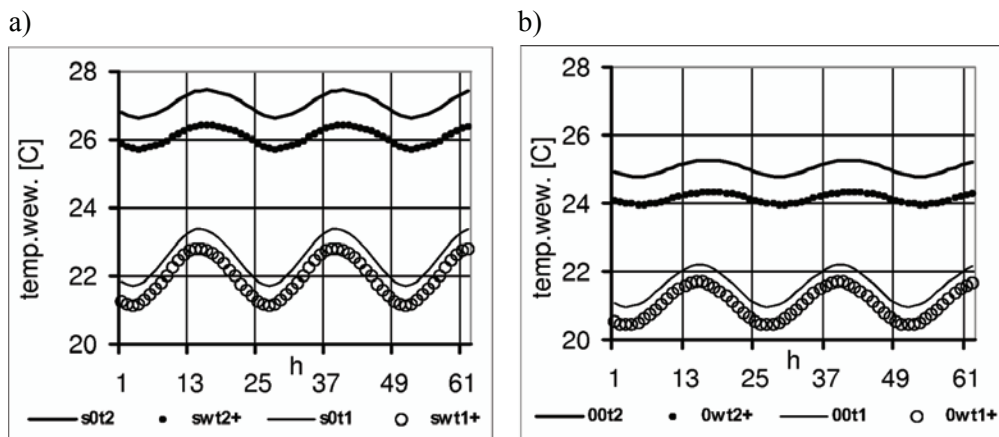
Ad. 1.c. Zamiana stropów o dużej pojemności cieplnej na stropy lekkie powoduje wzrost temperatury w górnej strefie budynku, tak w obecności wiatru wspomagającego i promieniowania słonecznego, jak i bez oddziaływania obu tych parametrów. Przy poprzednio analizowanych konfiguracjach obu stropów, tj przy obu stropach ciężkich, jak i tylko przy ciężkim stropie zewnętrznym, dla wymuszeń (0wt) i (00t), temperatury w strefie dolnej okresowo przekraczają temperatury w strefie górnej. Przy stropach lekkich proces ten nie zachodzi i temperatury w strefie drugiej są zawsze wyższe od temperatur w strefie pierwszej.

Niska akumulacja ciepła w przegrodach lekkich i ich duży opór cieplny powoduje, że temperatura wnętrza jest bardzo zbliżona do temperatury przegród. Wymiana ciepła przy obu stropach lekkich zachodzi, w przeważającej mierze, przez ściany. Ściany akumulują ciepło, dlatego też temperatury w dolnej strefie zmieniają się niewiele, w porównaniu do dwóch poprzednich przypadków. W strefie drugiej natomiast brak ciężkiego stropu skutkuje wzrostem temperatury. Należy pamiętać, że do drugiej strefy przepływa powietrze ogrzane w strefie pierwszej, stąd też zapotrzebowanie na odprowadzenie ciepła jest tam wyższe, niż w strefie dolnej. W skondensowanej formie opisane powyżej wyniki symulacji przedstawia tablica 7.3.1.

Przy wietrze wspomagającym wymiana powietrza kształtuje się podobnie jak przy stropach ciężkich. W sytuacji braku wiatru ilość wymienianego powietrza jest jednak wyższa i przy wymuszeniu (00t) nie występuje przepływ odwrotny, ponieważ temperatura wnętrza jest zawsze wyższa od temperatury otoczenia.

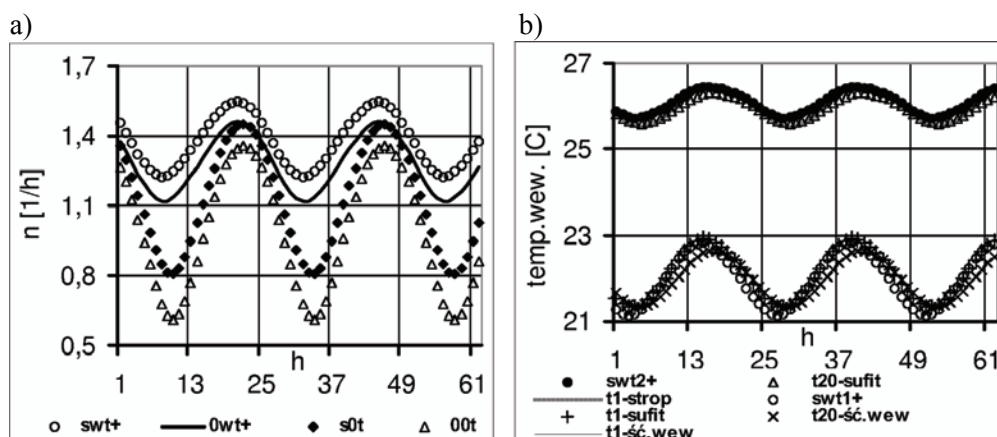
### 7.3.2. Budynek nr 2

Wyniki symulacji numerycznych procesów cieplno-przepływowych, w dwustrefowym budynku lekkim, przedstawiają wykresy na rys. 7.3.6–7.3.9. Strop wewnętrzny budynku jest stropem lekkim.



Rys. 7.3.6. Budynek nr 2. Dobowe przebiegi temperatury w budynku lekkim w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ .

Wymuszenie: a) swt+ i s0t, b) 0wt+ i 00t



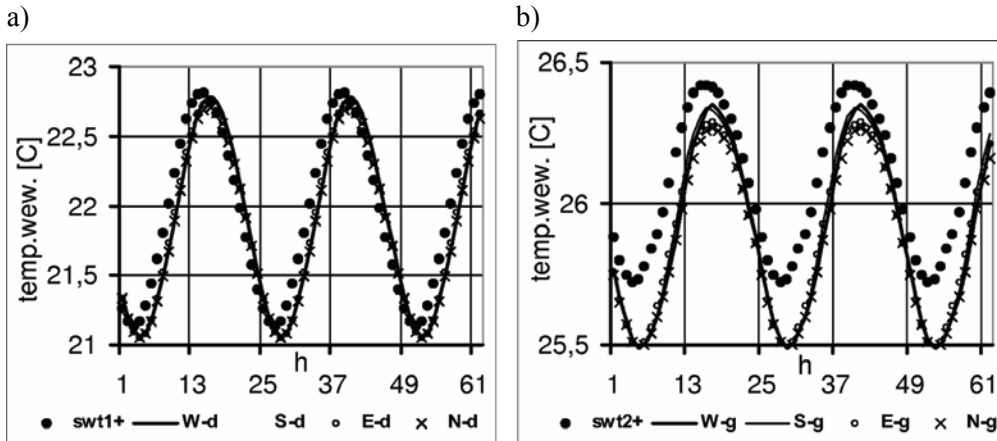
Rys. 7.3.7. Budynek nr 2. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi:

a) liczby wymian powietrza wentylacyjnego,

b) temperatury: warstw  $t_{1-sufit}$  i  $t_{20-sufit}$ , wewnętrznej warstwy stropodachu  $t_{1-strop}$  oraz skrajnych warstw akumulujących ciepło z pomieszczenia

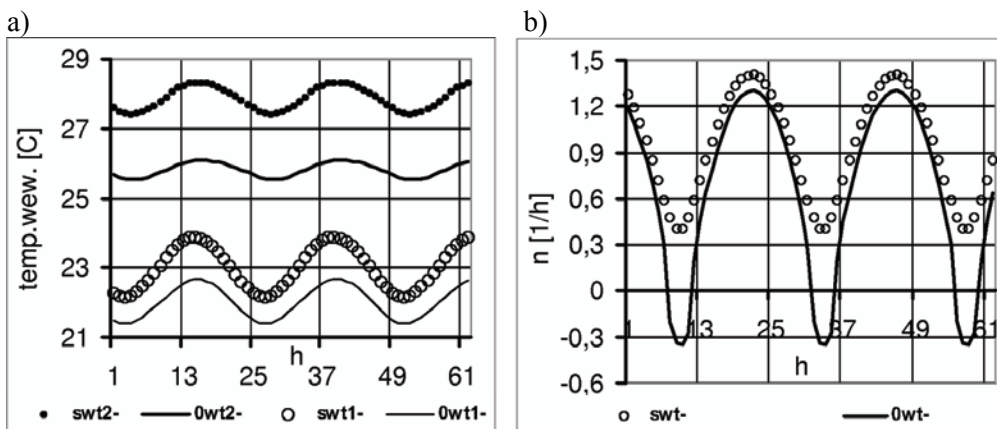
Duży opór cieplny przegród zewnętrznych utrudnia wymianę ciepła przez ściany i stropodach. Proces ten obejmuje zarówno oddawanie nadmiaru ciepła z wnętrza budynku przez jego przegrody zewnętrzne, jak i pozyskiwanie ciepła z otoczenia zewnętrznego, które pochodzi głównie z promieniowania słonecznego. Przegrody budynku nie akumulują także ciepła z pomieszczenia. Obie te cechy wpływają na wysoką wartość temperatury we wnętrzu budynku. Najsilniejszy wpływ ma promieniowanie słoneczne. Różnica pomiędzy temperaturą przy wymuszeniu (swt) i (0wt) wynosi w strefie drugiej około  $2^{\circ}\text{C}$ , w pierwszej zaś jest dużo niższa – (rys. 7.3.6a). Dobowe wahania temperatury, które kształtuje m.in. promieniowanie całkowite, różnią się znacznie od tych, występujących przy promieniowaniu rozproszonym, szczególnie w strefie drugiej – (rys. 7.3.6a i b). W godzinach nocnych, kiedy promieniowanie słoneczne nie wpływa na budynek, przepływ powietrza jest we wszystkich czterech przypadkach zbliżony – mimo że wymuszenie (swt) i (0wt) obejmuje działanie wiatru. W czasie operacji słonecznej postępuje spadek różnicy gęstości powietrza i jeśli wiatr nie wspomaga przepływu, następuje znaczące obniżenie ilości powietrza przepływającego przez budynek. Przy stropach lekkich, niezależnie od struktury materiałowej ścian, temperatury wnętrza są bardzo podobne do temperatur stropów – (rys. 7.3.7b). W strefie pierwszej – temperatura wnętrza jest bardzo zbliżona do temperatur poszczególnych ścian – (rys. 7.3.8). W strefie drugiej – temperatury ścian są także do siebie bardzo zbliżone, ale temperatura w pomieszczeniu jest nieznacznie od nich wyższa – (rys. 7.3.8b). Możliwy jest więc, prawie przez całą dobę, choć w minimalnym zakresie, proces wymiany ciepła.

Przy wietrze południowym najwyższa temperatura występuje przy wymuszeniu (swt). Temperatura w drugiej strefie przekracza w południe  $28^{\circ}\text{C}$  – (rys. 7.3.9a). Brak promieniowania słonecznego – (0wt) – obniża temperaturę podobnie jak przy wietrze północnym. Z wykresu na rys. 7.3.9b wynika, że udział



Rys. 7.3.8. Budynek nr 2. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej oraz w warstwie wewnętrznej ścian o orientacji: N, E, S, W w strefie: a) pierwszej, b) drugiej

wiatru w wymianie powietrza wentylacyjnego, w godzinach południowych, jest dużo niższy, niż wpływ wyporu termicznego. Spadek wymiany powietrza w tym okresie, w porównaniu z wiatrem wspomagającym, jest niewielki – (rys. 7.3.7a) i (rys. 7.3.9b). W tych godzinach wypór termiczny jest główną siłą sprawczą wentylacji. W pozostałych okresach doby spadek wymiany powietrza jest znaczny. Tłumienie przepływu wiatrem południowym może prowadzić do odwrotnych przepływów powietrza (0wt), podczas gdy słoneczne zyski energetyczne chronią przed tym procesem. Mimo występującego przy wymuszeniu (swt), w strefie pierwszej odwróconej relacji gęstości powietrza (temperatura otoczenia wyższa od temperatury wewnętrznej), przepływ w dalszym ciągu, choć wytlumiony, odbywa się ku górze



Rys. 7.3.9. Budynek nr.2. Wymuszenie swt- i 0wt-. Dobowe przebiegi a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$  b) liczby wymian powietrza wentylacyjnego

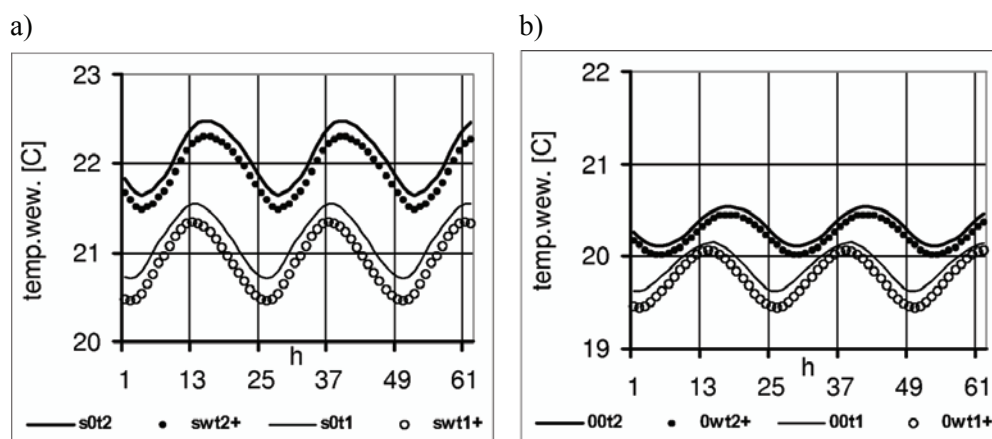


Prędkość wiatru wynosi wówczas  $1,93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . W tym wypadku słaby proces przenikania ciepła przez ściany, z wnętrza obiektu do otoczenia, pozwala utrzymywać wysoką temperaturę wewnętrzną i tym samym utrudnia powstawanie przepływu odwrotnego.

### 7.3.3. Budynek nr 3

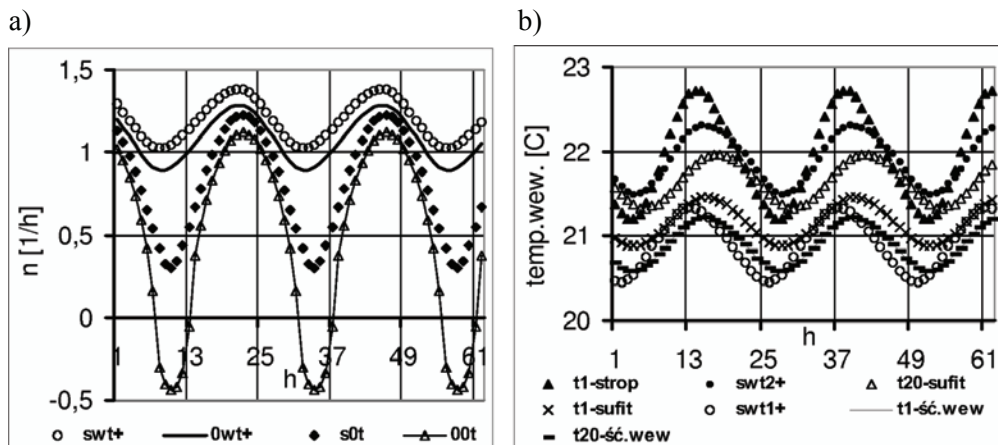
Wyniki symulacji numerycznych procesów ciepłno-przepływowych w dwustrefowym budynku wykonanym w technologii tradycyjnej, z ciężkim stropem pomiędzy piętrami, przedstawiają wykresy na rys. 7.3.10 – 7.3.13.

Dobowe przebiegi temperatur wewnętrznych, z udziałem promieniowania słonecznego, wahają się wokół  $21^\circ\text{C}$  w strefie pierwszej i  $21,5^\circ\text{C}$  w strefie drugiej – (rys. 7.3.10a). Amplituda nie przekracza  $1,2^\circ\text{C}$ . Widoczne są ok. 5-godzinne przesunięcia maksimów i minimów temperatury wewnętrznej, w stosunku do temperatury otoczenia. Wpływ wiatru na dobowy przebieg temperatur w strefach jest nieznaczny – (rys. 7.3.10a i b). Oddziaływanie wiatru można porównać do tego, jaki wywiera na budynek nr 1 – (rys. 7.3.1), bez względu na strukturę materiałową stropodachu. Jest ono mniejsze niż w budynku nr 2 – (rys. 7.3.8). Brak zysków energetycznych, pochodzących z promieniowania słonecznego, obniża temperaturę zarówno w strefie pierwszej, jak i drugiej – (rys. 7.3.11b). W tym przypadku widoczne jest bardzo wyraźne przesunięcie maksimów temperatur w strefach. Udział promieniowania w bilansie cieplnym budynku sprawia, że przez całą dobę temperatura w strefach jest wyższa od temperatury otoczenia i istnieje stały, ale o zmiennej intensywności, proces odpływu ciepła do otoczenia – (rys. 7.3.10a). W przypadku braku promieniowania słonecznego temperatura otoczenia jest wyższa od wewnętrznej. Pozyskiwanie ciepła przez przegrody nieprzezroczyste jest jednak ograniczone i ma mały wpływ na wartość temperatury wewnętrznej.



Rys. 7.3.10. Budynek nr 3. Dobowe przebiegi temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$

Wymuszenie: a) swt + i s0t, b) 0wt+ i 00t



Rys. 7.3.11. Budynek nr 3. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi:

a) liczby wymian powietrza

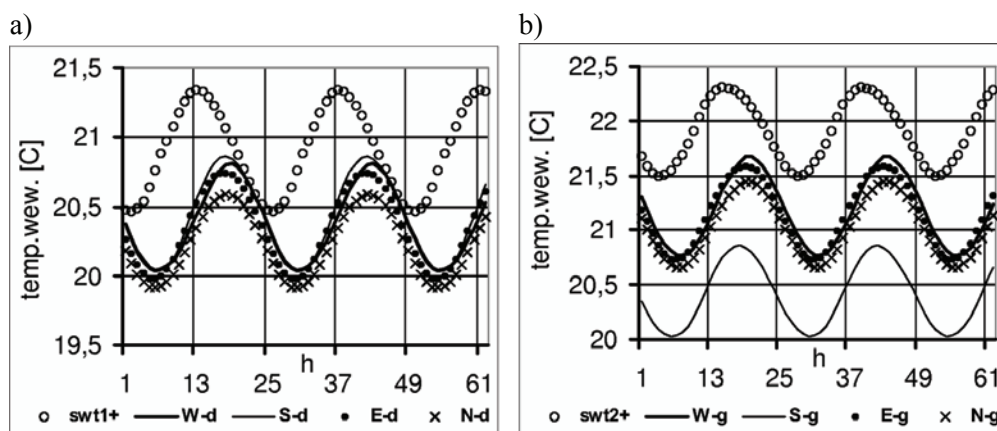
b) temperatury:  $t_{1-sufit}$  i  $t_{20-sufit}$ , wewnętrznej warstwy stropodachu  $t_{1-strop}$  oraz skrajnych warstw akumulujących ciepło z pomieszczenia

Wymiana powietrza wentylacyjnego przy wietrze wspomagającym (rys. 7.3.11a), odpowiada temperaturom z rys. 7.3.10a. Niezależnie od występowania lub braku promieniowania słonecznego, wymiana powietrza kształtuje się na podobnym poziomie. O ilości przepływającego przez budynek powietrza decyduje wiatr. Brak wiatru i słońca – (00t) wywołuje okresowo przepływy odwrotne.

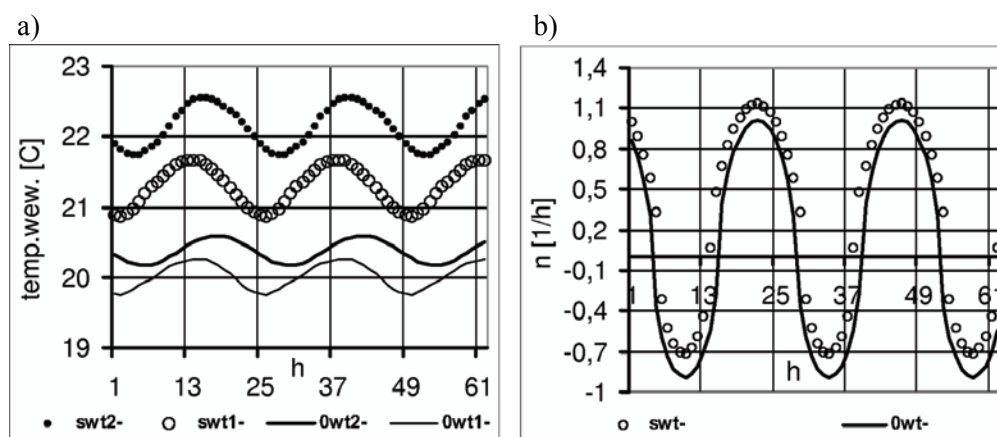
Rysunek 7.3.11b przedstawia dobowe wahania temperatur: wewnętrznych, stropów, ścian wewnętrznych, przy wymuszeniu (swt). Powietrze w strefie dolnej pobiera niewielkie ilości ciepła z sufitu, ze zmienną w czasie doby intensywnością. Pobiera także ciepło z wewnętrznej masy akumulacyjnej. Na piętrze podłoga przejmuje ciepło z powietrza. Z uwagi na niską izolacyjność stropodachu oraz jego ograniczone zdolności akumulacyjne, zyski energetyczne, pozyskiwane z promieniowania słonecznego, przekazywane są częściowo do wnętrza pomieszczenia.

W przypadku ścian zewnętrznych, proces wymiany ciepła w strefie dolnej zachodzi w godzinach dziennych. Najbardziej intensywnie wymiana odbywa się przez ścianę północną, a najmniej ciepła przenika przez ścianę południową – (rys. 7.3.12). W strefie górnej wymiana jest bardziej intensywna, bo występująca tam różnica temperatur jest większa – (rys. 7.3.12b).

Wykresy z rys. 7.3.13 pokazują przebiegi temperatur i liczby wymian powietrza przy działaniu wiatru południowego. Przy wymuszeniu (swt), w okresach najintensywniejszego przepływu odwrotnego, różnice gęstości powietrza wewnętrznego i zewnętrznego są bardzo niewielkie. Maksymalna temperatura wewnętrzna wynosi wówczas  $22,6^{\circ}\text{C}$ , a otoczenia – przekracza niewiele  $21^{\circ}\text{C}$ . Siłą sprawczą wentylacji jest zatem głównie wiatr. Jego prędkość wynosi w tym okresie  $1,8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Przy braku promieniowania słonecznego np. (0wt–) nawet spadek ciśnienia, wynikający z różnicy gęstości powietrza, wywołuje przepływ odwrotny, bo temperatura wewnętrzna w strefie drugiej wynosi średnio niewiele ponad  $20^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 7.3.12. Budynek nr 3. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej, w warstwie wewnętrznej ścian o orientacji: N, E, S, W w strefie:  
a) pierwszej, b) drugiej



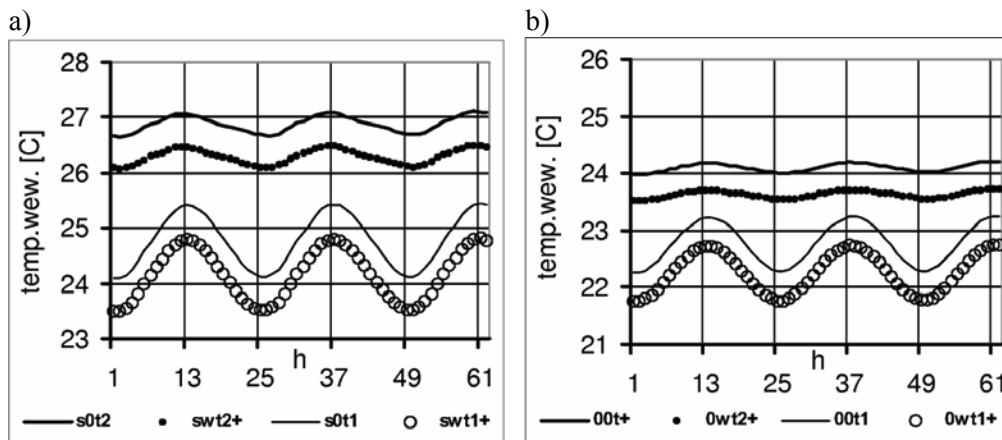
Rys. 7.3.13. Budynek nr 3. Wymuszenie: swt- i 0wt-. Dobowe przebiegi  
a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$   
b) liczby wymian powietrza wentylacyjnego

#### 7.3.4. Budynek nr 4

Wyniki symulacji numerycznych procesów ciepłno-przepływowych w dwustrefowym budynku, wykonanym w technologii tradycyjnej, zaizolowanym cieplnie przedstawiają wykresy na rys. 7.3.14–7.3.17.

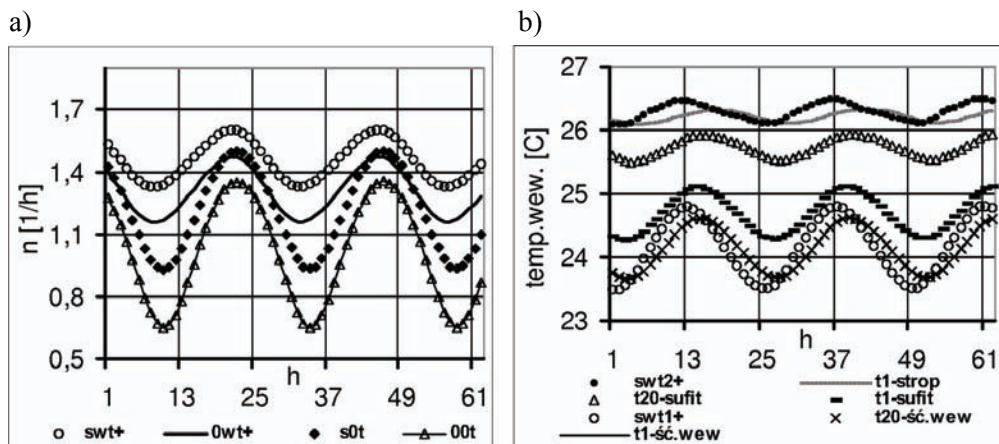
Wewnętrzna masa akumulująca ciepło z pomieszczenia, jak i strop wewnętrzny, pozostają bez zmian i są takie jak w budynku nr 3.

Wykresy na rys. 7.3.14 wskazują na znaczny wzrost temperatury w budynku zaizolowanym cieplnie – (nr 4), w porównaniu z obiektem nr 3 – nieocieplonym – (rys. 7.3.10a). Z racji podniesionej izolacyjności przegród, zwiększa się wpływ wiatru, co widać z porównania procesów będących wynikiem wymuszenia (swt) i (s0t)



Rys. 7.3.14. Budynek nr 4. Dobowe przebiegi temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ . Wymuszenie: a)  $swt+$  i  $s0t$ , b)  $0wt+$  i  $00t$

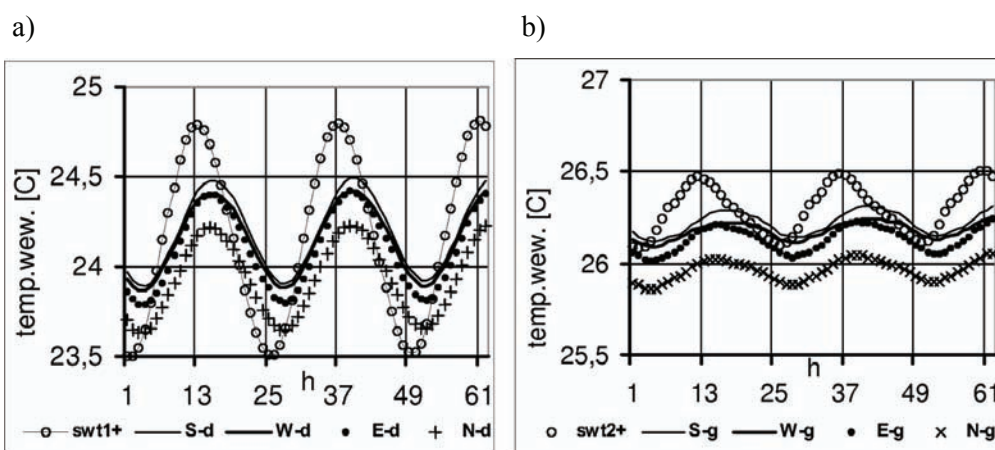
oraz ( $00t$ ) i ( $0wt$ ). W budynku nr 4 nie występują przepływy odwrotne (rys. 7.3.15a), ponieważ temperatura wewnętrzna nie jest w żadnym okresie doby niższa od temperatury otoczenia. Temperatura w strefie pierwszej jest niższa od temperatury sufitu. Mniej intensywnie niż w budynku bez izolacji cieplnej, ciepło wymieniane jest przemiennie ze ścianą wewnętrzną.



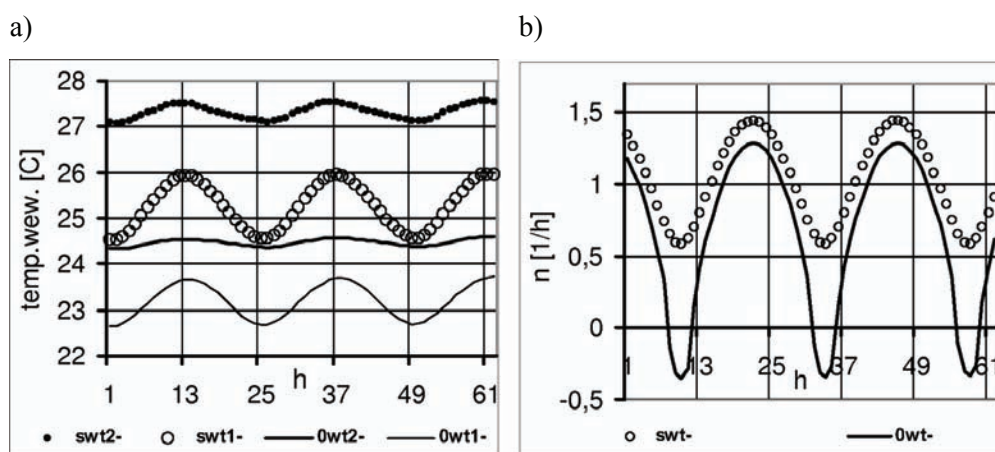
Rys. 7.3.15. Budynek nr 4. Wymuszenie  $swt+$ . Dobowe przebiegi: a) liczby wymian powietrza, b) temperatury:  $t_{1-sufit}$  i  $t_{20-sufit}$ , wewnętrznej warstwy stropodachu  $t_{1-strop}$ , temperatur wewnętrznych oraz skrajnych warstw akumulujących ciepło

W godzinach nocnych temperatura pierwszej warstwy stropodachu pokrywa się z temperaturą w strefie drugiej. W pozostałych godzinach doby, stropodach pobiera ciepło z pomieszczenia podobnie jak podłoga – (rys. 7.3.15b). Przez większą część doby, przy wymuszeniu ( $swt$ ), zachodzi wymiana ciepła pomiędzy pomiesz-

czeniu a wewnętrzną warstwą ścian. W przypadku ściany północnej proces ten trwa niemal całą dobę – (rys. 7.3.15a). W strefie górnej wymiana ciepła odbywa się z różną intensywnością, w zależności od orientacji ściany. Zbliżone są do siebie temperatury ściany południowej i zachodniej. W lipcu, w naszej szerokości geograficznej, ściana wschodnia zbiera minimalnie więcej promieniowania słonecznego, niż ściana południowa. Najintensywniejsza wymiana ciepła zachodzi pomiędzy ścianą północną, a wnętrzem budynku.



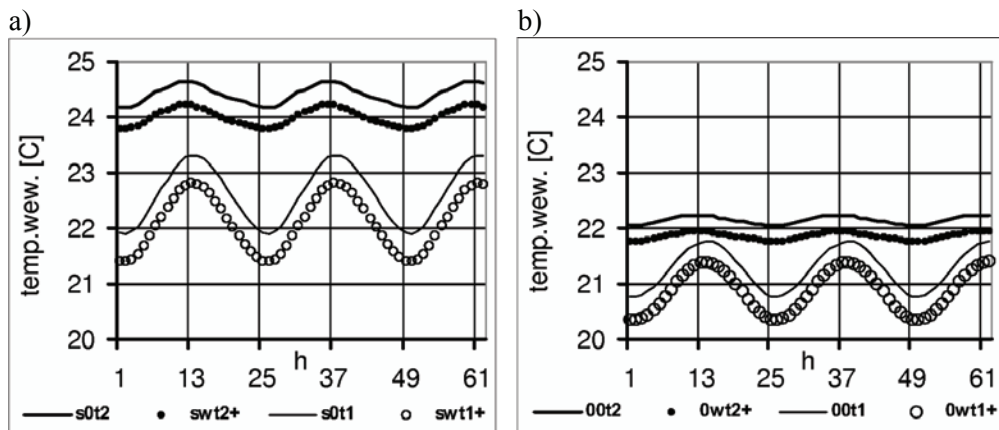
Rys. 7.3.16. Dobowe przebiegi temperatury w wewnętrznej warstwie ścian o orientacji: W, S, E, N oraz temperatury wewnętrznej przy wymuszeniu swt+ w strefie a) pierwszej i b) drugiej budynku ocieplonego



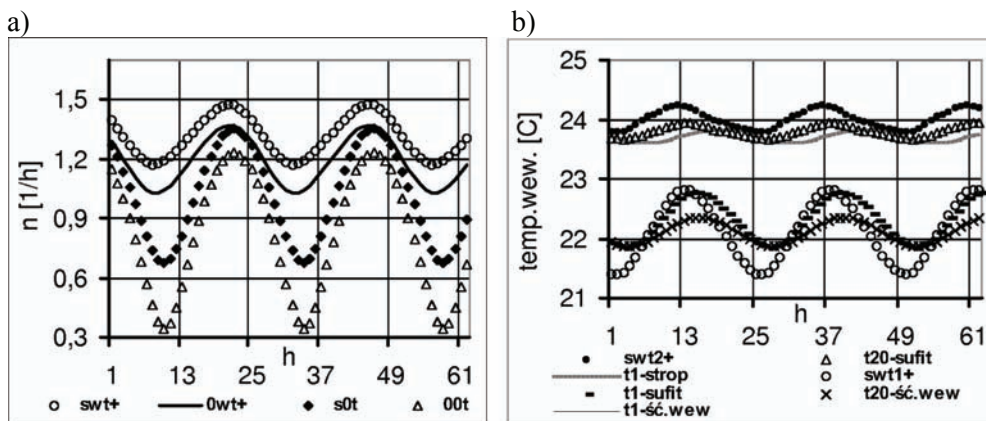
Rys. 7.3.17. Budynek nr 4. Wymuszenie: swt- i 0wt-. Dobowe przebiegi a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza wentylacyjnego

## 7.3.5. Budynek nr 5

Wyniki symulacji numerycznych procesów ciepłno-przepływowych, w dwustrefowym budynku drewnianym, przedstawiają wykresy na rys. 7.3.18 – rys. 7.3.21. Strop między piętrami jest konstrukcji drewnianej, wypełniony wełną mineralną. Jego grubość wynosi 20 cm. Wewnętrzna masa akumulująca ciepło z pomieszczenia pozostaje bez zmian, tak jak w budynkach nr 1– nr 4.



Rys. 7.3.18. Budynek nr 5. Dobowe przebiegi temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ . Wymuszenie: a) swt+ i s0t, b) 0wt+ i 00t



Rys. 7.3.19. Budynek nr 5. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi: a) liczby wymian powietrza wentylacyjnego, b) temperatury: wewnętrzne,  $t_{1\text{-sufit}}$  i  $t_{20\text{-sufit}}$ , wewnętrznej warstwy stropodachu  $t_{1\text{-strop}}$  oraz skrajnych warstw akumulującej ciepło z pomieszczenia

Analiza otrzymanych wyników wskazuje, że przy podobnej wymianie powietrza, jaka zachodzi w budynku nr 2 – lekkim, w domu nr 5 – drewnianym panują lepsze warunki i porównywalne z tymi, które występują w budynku nr 1 – ciężkim, wyposażonym w stropy lekkie.

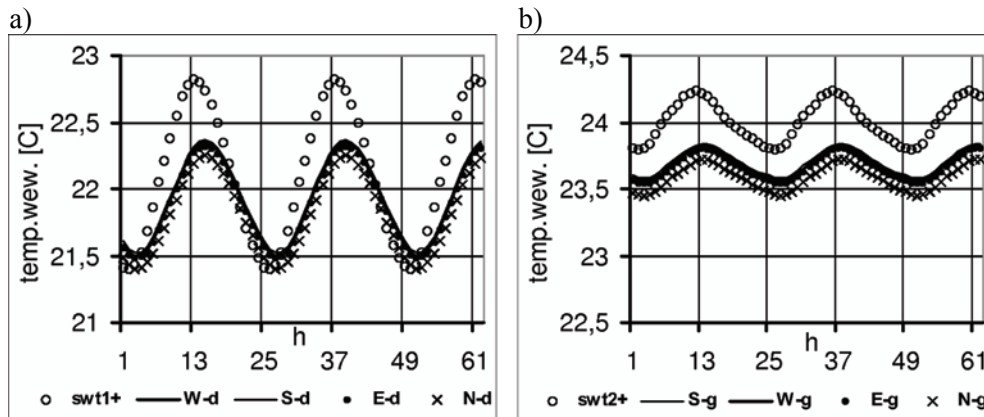
Tablica 7.3.2. Wartości ekstremalne liczby wymian powietrza wentylacyjnego oraz temperatur w obu strefach budynku, przy wymuszeniu wiatrem wspomagającym (+) oraz przeciwnym (-)

| nr bud.                  | 1b           | 2            | 3            | 4           | 5            |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| <b>swt +</b>             |              |              |              |             |              |
| $T_{i1}$ [°C]            | 21,0–22,4    | 21,2–22,8    | 20,4–21,3    | 23,5–24,8   | 21,4–22,7    |
| $T_{i2}$ [°C]            | 22,3–22,4    | 25,7–26,4    | 21,5–22,3    | 26,1–26,5   | 23,8–24,2    |
| $n$ [w·h <sup>-1</sup> ] | 1,08–1,40    | 1,23–1,58    | 1,02–1,38    | 1,33–1,60   | 1,17–1,47    |
| <b>swt –</b>             |              |              |              |             |              |
| $T_{i1}$ [°C]            | 21,5–22,7    | 21,2–23,8    | 20,9–21,7    | 24,5–25,9   | 22,3–23,8    |
| $T_{i2}$ [°C]            | 22,5–22,7    | 27,4–28,3    | 21,8–22,6    | 27,1–27,5   | 24,5–25,0    |
| $n$ [w·h <sup>-1</sup> ] | (-0,62)–1,28 | 0,40–1,40    | (-0,67)–1,12 | 0,58–1,44   | (-0,28)–1,29 |
| <b>s0t</b>               |              |              |              |             |              |
| $T_{i1}$ [°C]            | 21,6–22,4    | 21,7–23,4    | 20,7–21,5    | 24,1–25,4   | 21,9–23,3    |
| $T_{i2}$ [°C]            | 22,4–22,6    | 26,6–27,4    | 21,5–22,5    | 26,7–27,1   | 24,2–24,6    |
| $n$ [w·h <sup>-1</sup> ] | 0,46–1,26    | 0,83–1,44    | 0,30–1,23    | 0,94–1,50   | 0,68–1,35    |
| <b>0wt +</b>             |              |              |              |             |              |
| $T_{i1}$ [°C]            | 19,7–20,7    | 20,5–21,7    | 19,7–20,1    | 21,8–22,7   | 20,4–21,4    |
| $T_{i2}$ [°C]            | 20,3–20,4    | 24,0–24,3    | 20,0–20,5    | 23,5–23,7   | 21,8–22,0    |
| $n$ [w·h <sup>-1</sup> ] | 0,93–1,30    | 1,12–1,44    | 0,89–1,28    | 1,16–1,50   | 1,03–1,35    |
| <b>0wt –</b>             |              |              |              |             |              |
| $T_{i1}$ [°C]            | 20,1–20,8    | 21,5–22,7    | 19,8–20,3    | 22,7–23,7   | 21,0–22,0    |
| $T_{i2}$ [°C]            | 20,5–20,6    | 25,6–26,1    | 20,2–20,6    | 24,4–24,6   | 22,2–22,4    |
| $n$ [w·h <sup>-1</sup> ] | (-0,85)–1,03 | (-0,35)–1,40 | (-0,89)–1,00 | -0,28)–1,27 | (-0,65)–1,13 |
| <b>00t</b>               |              |              |              |             |              |
| $T_{i1}$ [°C]            | 19,9–20,7    | 21,0–22,2    | 19,7–20,1    | 22,3–23,2   | 20,8–21,8    |
| $T_{i2}$ [°C]            | 20,4–20,5    | 24,8–25,4    | 20,1–20,5    | 24,0–24,2   | 22,0–22,2    |
| $n$ [w·h <sup>-1</sup> ] | (-0,34)–1,13 | 0,61–1,34    | (-0,44)–1,11 | 0,67–1,35   | 0,34–1,22    |

Izolacja stropu wełną mineralną wyznacza zawsze pewien schemat wymiany ciepła. Schemat ten sprowadza się do bardzo podobnych przebiegów temperatury wewnętrznej i temperatury wewnętrznej warstwy stropu. W bardzo ograniczonym zakresie, występuje więc wymiana i akumulacja ciepła. W omawianym budynku ciepło z pomieszczenia w pierwszej strefie przekazywane jest do stropu tylko w godzinach rannych.

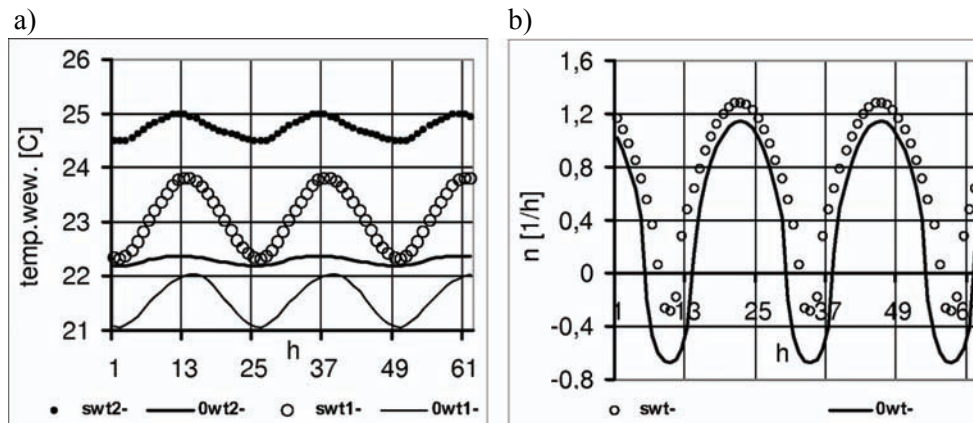
Natomiast wymiana ciepła pomiędzy wnętrzem obiektu i ścianą wewnętrzną zachodzi przemiennie przez całą dobę. W strefie drugiej temperatura wnętrza jest wyższa od temperatury pierwszej warstwy stropu oraz okresowo – od temperatury

ostatniej warstwy stropu wewnętrznego – (podłogi). Zachodzi więc proces oddawania ciepła – (rys. 7.3.19b).



Rys. 7.3.20. Budynek nr 5. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi temperatury: wewnętrznej oraz w wewnętrznej warstwie ścian o orientacji: N, E, S, W w strefie: a) pierwszej, b) drugiej

Temperatura w strefie drugiej jest, przez całą dobę, wyższa od temperatury ścian wszystkich orientacji, tak jak to miało miejsce w budynku nr 3, nie zaizolowanym cieplnie. Przy wietrze południowym, tak jak w poprzednio omawianych przypadkach, wyższe temperatury wewnętrzne generują większe spadki ciśnień. Osłabiają więc przepływ odwrotny, a wręcz przywracają normalny kierunek przepływu powietrza przez budynek – (rys. 7.3.17b).



Rys. 7.3.21. Budynek nr 5. Wymuszenie: swt-, 0wt-. Dobowe przebiegi a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

Przy wietrze południowym, przeciwnym, omawiane procesy przedstawiają wykresy na rys. 7.3.21. W tym wypadku, mimo niesprzyjającego wiatru, warunki panujące w obiekcie drewnianym, w tym wypadku, są lepsze niż w budynku nr 2.



Najwyższa temperatura w budynku nr 2 przy wymuszeniu (swt–), wynosi 28,3°C, a w drewnianym 25°C. Brak promieniowania sprawia, że temperatura sięga nie 26,1°C, a jedynie 22,4°C – tablica 7.3.2.

### 7.3.6. Podsumowanie

Procesy ciepłno-przepływowe, symulowano numerycznie przy pełnym wymuszeniu parametrów klimatu. Budynki dwustrefowe podobnie jak obiekty jednostrefowe, mają jednakową powierzchnię i orientację okien oraz powierzchnię otworów wentylacyjnych. Stąd uzyskane wyniki pozwalają na ocenę wpływu struktury ścian na warunki cieplne, panujące w poszczególnych budynkach. Moc wewnętrznej źródła w każdej ze stref jest taka sama, jak w budynku jednostrefowym.

We wszystkich analizowanych budynkach, podobnie jak to miało miejsce w obiektach jednostrefowych, obecność wiatru wspomagającego jest czynnikiem wyrównującym przebiegi wymiany powietrza wentylacyjnego. Wiatr napływający od południa, szczególnie przy braku promieniowania bezpośredniego, także tłumi lub wręcz odwraca okresowo kierunek przepływu powietrza.

W tablicy 7.3.2 zestawiono z przebiegów dziennych, ekstremalne, wartości temperatury wewnętrznej, w każdej ze stref budynku oraz całkowitą liczbę wymian powietrza wentylacyjnego.

Analogicznie do budynków jednostrefowych, szczególnej uwagi architekta wymagają budynki nr 2 i nr 4. Budynek dwustrefowy może być traktowany jako budynek z poddaszem użytkowym. W budynkach nowowznoszonych stanowi to powszechną praktykę, natomiast w budynkach istniejących, w ramach zabiegów termomodernizacyjnych, przystosowuje się poddasze do celów mieszkalnych. W omawianych przykładach występuje stropodach o niewielkim spadku. Sumy dobowe promieniowania całkowitego, które zbiera jego płaszczyzna, są bardzo zbliżone do tych z płaszczyzny równoległej do powierzchni gruntu. W obiektach o konstrukcji szkieletowej obecnie wznoszonych projektuje się rozbudowane spadziste dachy w których montowane są okna połaciowe. Dostępność promieniowania słonecznego, za pośrednictwem okien połaciowych, pogarsza znacznie warunki cieplne w porównaniu do przedstawionych w tablicy 7.3.2. Warto pamiętać, że dla Warszawy płaszczyzny pochylone w granicach od 42° do 62° i zorientowane w stronę południową z odchyleniem +15°, przynoszą największe zyski energetyczne w skali całego roku [34, 35].

Badane budynki dwustrefowe są obiektami o otwartej strukturze wewnętrznej, a więc i o swobodnym przepływie powietrza pomiędzy strefami. Spadki ciśnienia, które mogą występować na typowych drzwiach wewnętrznych, nie odgrywają istotnej roli w bilansie ciśnień. Strefa druga, w każdym zakresie wymuszenia zewnętrznego, wymaga intensywnego odprowadzenia ciepła. Ale ponieważ budynek ma otwartą wewnętrzną strukturę przestrzenną, więc intensyfikacja przepływu powietrza przez wsparcie mechaniczne może doprowadzić do wychłodzenia strefy pierwszej. Dlatego tak istotna jest, na poziomie wstępnych założeń projektowych, regulacja dostępności promieniowania słonecznego.

Wszystkie uwagi, które zamieszczono w podsumowaniu rozdziału 7.2 odnoszą się także do rozdziału bieżącego z zaznaczeniem, że problemy ciepłno-przepływowe w budynkach dwustrefowych występują ostrzej, w strefie górnej. Problem nabiera szczególnej ostrości jeśli strefa druga przejmuje funkcję poddasza użytkowego. Stąd też domy dwustrefowe wymagają od projektanta dużego zaangażowania w wyborze poprawnych założeń projektowych oraz głębszego zrozumienia problemów ciepłno-przepływowych. Wymagają również zrozumienia roli i skutków wyposażania budynków w rozwiązania zarówno tak helioaktywne jak i heliopasywne.

Dodatkowo warto zaznaczyć, że obecne trendy architektoniczne dopuszczają dowolne formowanie bryły budynku, a więc i takie, które spełni wymagania odnośnie kształtu, usytuowania i wielkości odpowiednich powierzchni w aspekcie energetycznym.

Przyjęty w pracy tryb analizowania procesów ciepłno-przepływowych nie ogranicza się jedynie do prostego przełożenia relacji pomiędzy parametrami klimatu a intensywnością wymiany powietrza i temperaturą zewnętrzną. Poszerzony jest o identyfikowanie strumieni ciepła wymienianych na drodze: otoczenie zewnętrzne – przegroda budynku – wnętrze budynku. Ta forma prezentacji zachodzenia zjawiska w przejrzysty sposób przedstawia skutki przyczynowo-skutkowe jego powstawania. Wybór i rozmieszczenie materiału budowlanego oraz technologii wznoszenia obiektu może być niemal dowolny są też wydaje się zasadne takie poszerzenie analizowania badanych procesów.

W sytuacji kiedy istnieje zapotrzebowanie na budynki, których przegrody charakteryzują się dużym oporem przenikania ciepła i małą zdolnością do jego akumulacji, to istnieje także potrzeba dostarczania projektantom niezbędnych informacji i narzędzi do pogłębienia ich wiedzy i wyostrenia intuicji, czemu służą takie narzędzia jak przedstawiony w pracy program komputerowy oraz wykonane z jego pomocą obliczenia, które mogą i powinny pomagać oraz wspierać proces tworzenia budynków energooszczędnych nie tylko w sezonie grzewczym, ale i w okresach największego nasłonecznienia.

## 8. Analiza wyników obliczeń, uzyskanych z rozwiązania modeli Li, Delsante i symulacji numerycznych w budynku jedno- i dwustrefowym, z naturalną wentylacją

### 8.1. Charakterystyka badań

W bieżącym rozdziale przeprowadzono analizę wyników obliczeń otrzymanych z rozwiązania równań bilansowych modeli Li, Delsante oraz symulacji numerycznych, które wykonano za pomocą autorskiego programu komputerowego. Porównano charakter przebiegów dobowych temperatur wewnętrznych i przepływu powietrza wentylacyjnego, niezależnie dla budynku jedno- i dwustrefowego w lipcu.

Wynikiem rozwiązania algebraicznych równań nieliniowych modeli Li, Delsante dla procesów ciepło-przepływowych w budynku jedno- i dwustrefowym, są strumienie objętości powietrza wentylacyjnego w stanie ustalonym. Funkcje, lewe strony równań, w miejscach zerowych są aproksymowane funkcjami harmonicznymi parametrów pogody. Zabieg aproksymacji umożliwia otrzymanie rozszerzonych informacji o dobowych wahaniami ilości przepływającego przez budynek powietrza, a po dokonaniu przekształceń – temperatury wewnętrznej. W przypadku budynku jednostrefowego model opisują nieliniowe równania trzeciego stopnia, przy dwustrefowym – równania czwartego stopnia.

Z racji aproksymacji dokonanej funkcjami harmonicznymi modeli Li, Delsante i a priori przyjętego opisu wymuszeń pogodowych w postaci tych samych funkcji harmonicznymi w algorytmie numerycznym, uprawniona jest wspólna analiza wyników obliczeń.

Opis i założenia modeli, wraz z przedstawionym wyprowadzeniem i rozwiązaniem analitycznym równań dla budynku jednostrefowego, znajduje się w rozdziale 5, schemat badanych obiektów budowlanych – w rozdziale 6, tak jak i opis i założenia oraz możliwości autorskiego programu komputerowego.

Tablica 8.1. Dane charakterystyczne budynku jednostrefowego dla modelu Li, Delsante

| grubość przegrody                              | 30<br>[cm] | 13<br>[cm] | 8<br>[cm] |
|--|------------|------------|-----------|
| $U_s$<br>[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ] | 0,20       | 0,38       | 0,80      |
| $\beta$<br>[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]  | 0,0083     | 0,0116     | 0,0202    |

Jak podano w rozdziale 5, oba modele Li, Delsante posiadają dwa ograniczenia, w stosunku do matematycznego opisu zjawisk ciepłno-przepływowych, wykorzystywanych w symulacjach numerycznych. Mianowicie, modele te nie uwzględniają akumulacji ciepła, stąd mogą opisywać zjawiska przepływowe w obiektach o niewielkiej pojemności cieplnej przegród zewnętrznych. Pomijają także wewnętrzną masę akumulacyjną. Drugie ograniczenie jest konsekwencją przyjęcia pierwszego, a mianowicie słoneczne zyski energetyczne budynek pozyskuje jedynie za pośrednictwem okien. Stąd też wyniki symulacji numerycznych, które wykonano za pomocą autorskiego programu komputerowego, a które są prezentowane w bieżącym rozdziale, uzyskano przy tych samych ograniczeniach.

Tablica 8.2. Dane charakterystyczne budynku dwustrefowego dla modelu Li, Delsante

| grubość przegrody                                 | 30 [cm] | 13 [cm] | 8 [cm] |
|---|---------|---------|--------|
| $U_{s1}$<br>[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ] | 0,149   | 0,360   | 0,631  |
| $U_{s2}$<br>[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ] | 0,150   | 0,394   | 0,650  |
| $\beta_1$<br>[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]   | 0,0074  | 0,0110  | 0,0150 |
| $\beta_1$<br>[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]   | 0,0054  | 0,0100  | 0,0160 |

Do analizy posłużył jednostrefowy budynek nr 2 z punktu 7.2 oraz budynek nr 2 z punktu 7.3. Rozpatrywano trzy wersje tego budynku. W pierwszej wersji ściany budynku mają 30 cm, w drugiej – 13 cm, a w trzeciej – 8 cm grubości.

Zarówno lokalizacja, jak i powierzchnia otworów wentylacyjnych, pozostaje w budynkach niezmienną, podobnie jak i przyjęta moc wewnętrznych źródeł – 300 W w każdej ze stref.

Obecnie algorytm numeryczny, zgodnie z modelem Li, Delsante, nie uwzględnia oddziaływania promieniowania słonecznego na przegrody nieprzezroczyste obiektu budowlanego. Dla celów porównawczych rys. 8.1–8.5 zawierają numeryczne wyniki obliczeń, które uwzględniają to zjawisko. Dotyczy to jedynie budynku o przegrodach 30 cm, bo tylko budynek o tej grubości przegród był rozpatrywany w rozdziale 7.2 i 7.3.

Do identyfikacji wyników obliczeń posłużono się symbolami:

- w przypadku symulacji numerycznych – takimi jak w rozdziale 7.2, 7.3, które odpowiadają oddziaływaniom parametrów pogody, choć promieniowanie słoneczne uczestniczy tylko w procesie zachodzącym przez okna;

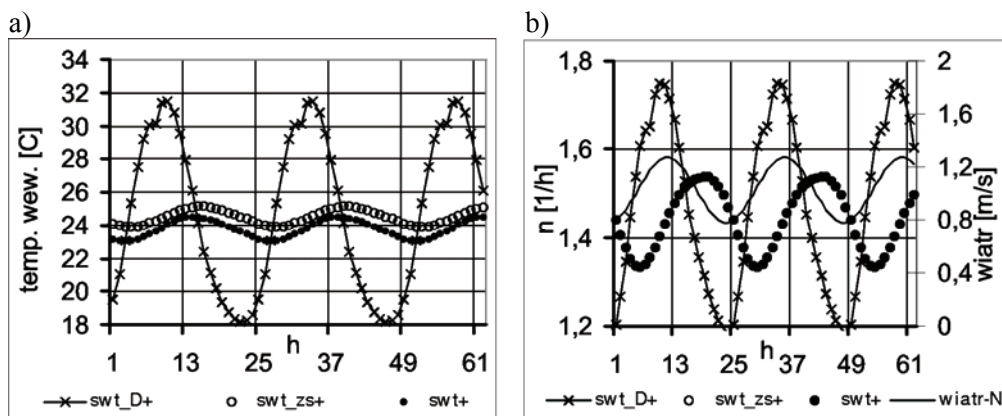
- w przypadku modelu Li, Delsante:
  - przy wietrze wspomagającym dodatkową literą – „D”,
  - przy wietrze przeciwnym: D\_I dla  $\dot{V}_{pocz} = 20$  i D\_II dla  $\dot{V}_{pocz} = 0,001$  (obiekt dwustrefowy).

Jak wykazano w rozdziale 5, budowa równań wynikająca z modelu dla obiektu dwustrefowego, zezwala na otrzymanie pierwiastków wielokrotnych zarówno rzeczywistych, jak i nierzeczywistych. Pierwiastki rzeczywiste wyznaczają historię przepływu powietrza przez budynek. Zjawisko to występuje głównie przy wietrze przeciwnym. Pierwiastki wielokrotne przy wietrze przeciwnym otrzymuje się z rozwiązania równań (5.50) i (5.51).

Dla zwięzłości opisu używany w tekście termin Model jest tożsamy z modelem Li, Delsante.

## 8.2. Wyniki obliczeń w budynku jednostrefowym

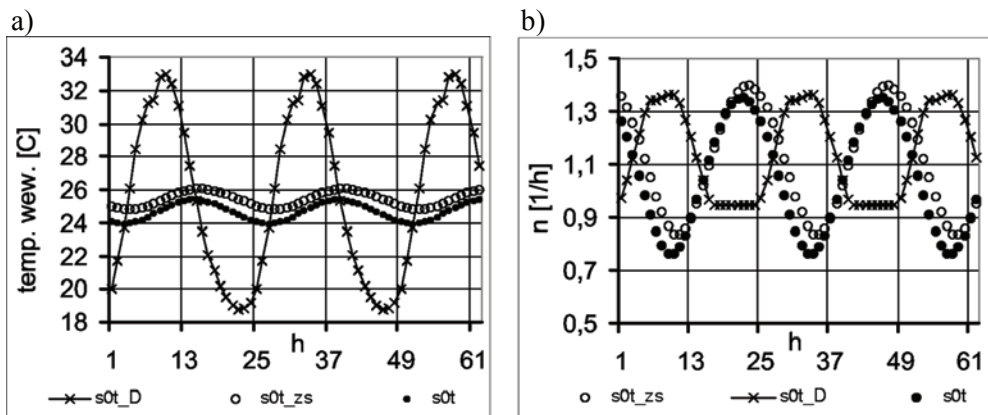
Wykresy na rys. 8.1–8.5 przedstawiają dobowe przebiegi temperatury wewnętrznej i strumienie objętości powietrza, w budynku nr 2 z 27 cm warstwą izolacyjną wykonaną z wełny mineralnej, przy kolejnych wymuszeniach: swt+, s0t, 0wt+, 00t – działa wiatr północny. Wyniki, które uzyskano z symulacji numerycznych, dotyczą dwóch przypadków. Pierwszy – (swt\_zs+) uwzględnia wpływ promieniowania słonecznego na przegrody nieprzezroczyste budynku, drugi go pomija – (swt+). Różnica pomiędzy wartościami obu temperatur wynosi około 1°C, a ich wahania dobowe są bardzo zbliżone do siebie. Amplituda przekracza niewiele ponad 1°C, widoczne są niewielkie przesunięcia względem siebie maksimów i minimów temperatur. Zjawisko to wynika z różnicy zakumulowanego ciepła w ścianach.



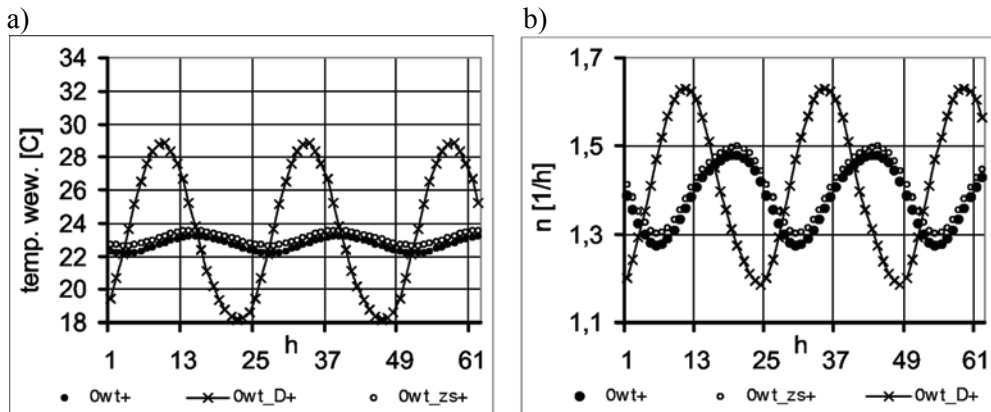
Rys. 8.1. Przegroda – 30 cm. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

Wełna mineralna jest materiałem budowlanym o małej gęstości, który w niewielkim zakresie jest w stanie akumulować w swojej masie ciepło dostarczane do jej

zewnątrznej powierzchni. Dlatego też ciepło z promieniowania słonecznego, które jest pozyskiwane za pośrednictwem okien, waży głównie na bilansie cieplnym obiektu. Stąd, dla celów szacunkowej analizy, uzasadnione być może pominięcie w Modelu promieniowania padającego na ściany budynku (rys. 8.1–8.5).



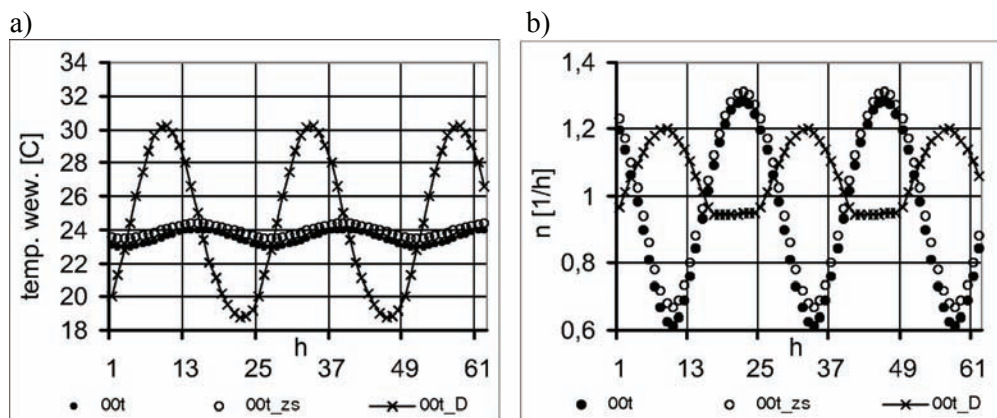
Rys. 8.2. Przegroda – 30 cm. Wymuszenie s0t. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza



Rys. 8.3. Przegroda – 30 cm. Wymuszenie 0wt. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

Wyniki, otrzymane z rozwiązania analitycznego, różnią się istotnie od wyników symulacji numerycznych i chociaż Model odnosi się do bilansu powietrza wewnętrznego, to nawet, przy tym ograniczeniu, osiągnięta we wnętrzu budynku temperatura wydaje się być mało realna. Przy przyjętych warunkach pogodowych maksymalne ilości powietrza przepływającego przez budynek osiągnięte są przy największej różnicy temperatur, co w przypadku Modelu nie występuje. Strumienie objętości powietrza, otrzymane z Modelu, różnią się średnio o 1/3 od tych obliczonych numerycznie. Ilość przepływającego przez budynek powietrza wynika m.in. z deficytu gęstości powietrza, ten z kolei jest także funkcją temperatury otoczenia,

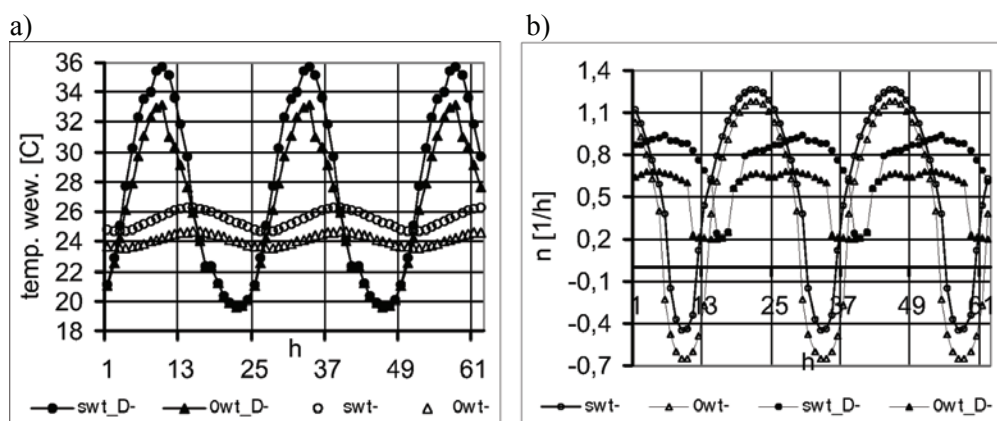
stąd też charakter przepływu powietrza jest zbliżony do dobowego przebiegu temperatury otoczenia. W obecności wiatru, dla wymuszeń (swt+D) i (0wt+D), wyniki przedstawiają rys. 8.1b i 8.3b – maksima i minima strumienia objętości powierza osiągane są w czasie największej i najmniejszej prędkości wiatru. Przesunięcie ekstremalnych wartości, w stosunku do rozwiązania numerycznego, dochodzi do pół doby. Brak oddziaływania kolejnych parametrów pogody nie zmienia sytuacji, bo podobne dysproporcje w wartościach i charakterze przebiegów, widoczne są na wykresach rys. 8.2–8.4.



Rys. 8.4. Przegroda – 30 cm. Wymuszenie 00t. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

W prowadzonych obliczeniach nigdy nie występuje całkowity brak promieniowania słonecznego, ponieważ założono działanie promieniowania całkowitego lub promieniowania rozproszonego, przy stałym zaciemnieniu.

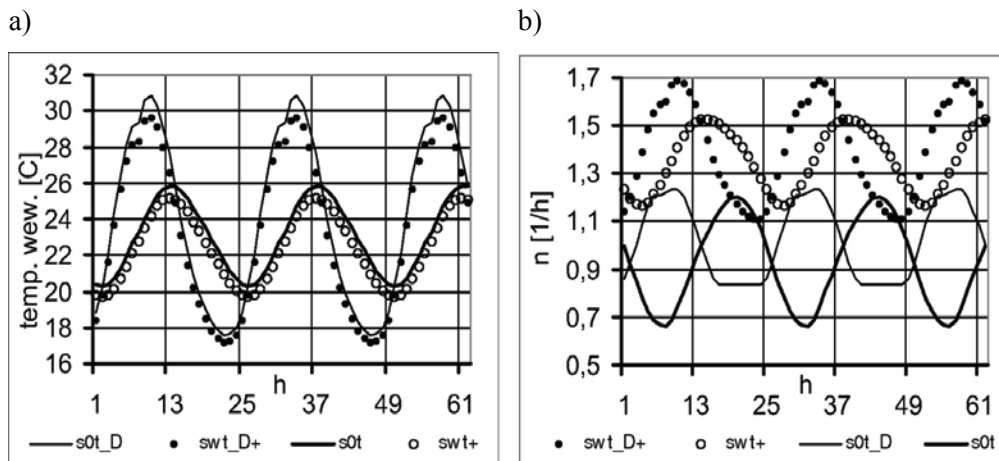
W przypadku przeciwnego napływu wiatru, tj. od strony południowej, występuje podobna niezgodność wyników w temperaturze wewnętrznej – (rys. 8.5a).



Rys. 8.5. Przegroda – 30cm. Wymuszenie swt-. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

Otrzymany z Modelu przepływ powierza przez budynek odbywa się zawsze ku górze, występuje jedynie jego znaczny spadek do  $0,2 \text{ w}\cdot\text{h}^{-1}$ , podczas gdy rozwiązanie numeryczne wskazuje na zmianę kierunku przepływu – (rys. 8.5b). Przesunięcie w fazie pomiędzy rozwiązaniami jest podobne jak przy wietrze wspomagającym. W przypadku Modelu wyraźniejszy jest wpływ promieniowania słonecznego. W godzinach maksymalnych zysków słonecznych następuje wzrost wyporu termicznego, który generuje intensywniejszy przepływ powietrza przez budynek.

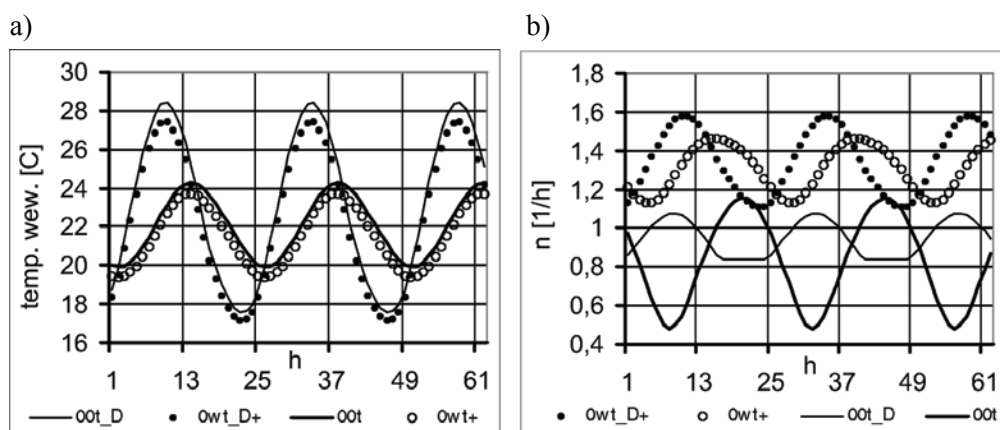
W budynku nr 2, o grubości ścian równej 13 cm, wypór termiczny, wzmagany przez wewnętrzne źródło ciepła i energetyczne zyski słoneczne dostarczane do wnętrza za pośrednictwem okna, pozostaje na niezmiennym poziomie w porównaniu do budynku o grubości ścian 30 cm, podobnie jak współczynnik  $\gamma$ , który charakteryzuje wpływ wiatru. Wzrasta jedynie o 40% wartość współczynnika  $\beta$ , który określa wpływ przewodności cieplnej przegród na ilości przepływającego przez budynek powietrza. Zmiana  $\beta$  wynika ze wzrostu współczynnika przenikania ciepła, który jest prawie dwukrotnie wyższy, niż dla budynku z przegrodami 30 cm. Ponieważ powierzchnia okien i ich współczynnik przenikania ciepła nie zmienia się, więc wzrost  $\beta$  odnosi się jedynie do przegród nieprzezroczystych. Różnice w wartościach temperatur wewnętrznych, obliczonych obiema metodami, nie są tak drastyczne jak w budynku 30 cm – (rys. 8.6a i rys. 8.7a). Występują jednak znaczne przesunięcia ekstremów w fazie. Podobnie jak poprzednio, temperatury wewnętrzne, otrzymane z rozwiązania analitycznego, są w swoich dobowych wahaniami podobne do dziennych przebiegów temperatury otoczenia. Ilości przepływającego, przy obecności wiatru wspomagającego – (swt+) i (0wt+), powietrza wentylacyjnego, wyliczone obiema metodami, są podobne – (rys. 8.6b) i (rys. 8.7b). Jednak wynik uzyskany z Modelu zbliżony jest w fazie do prędkości wiatru. Brak wiatru – wymuszenie (s0t) – (rys. 8.6b) zwiększa przesunięcie w fazie.



Rys. 8.6. Przegroda – 13 cm. Wymuszenie swt+, s0t. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza



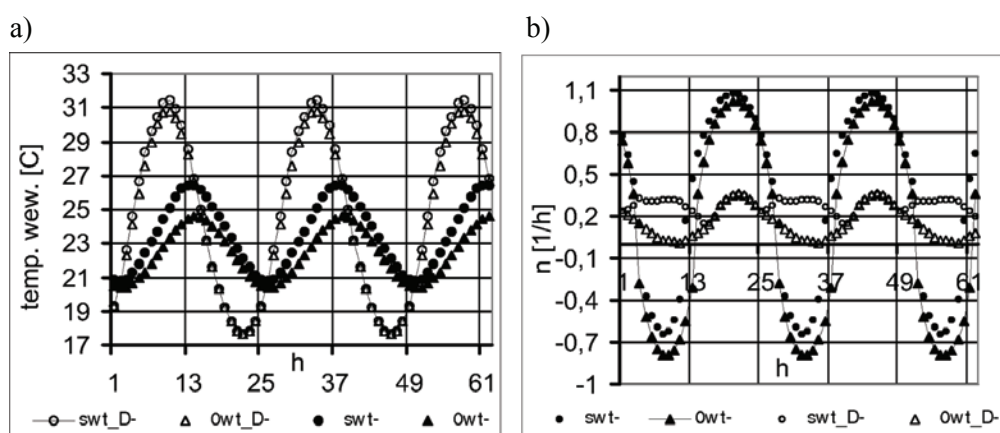
Nieobecność wiatru i spadek siły wyporu termicznego, z racji występowania w przypadku (00t), jedynie promieniowania rozproszonego – (rys. 8.7b) powoduje znaczne zmniejszenie przepływu powietrza przez budynek. Przebieg wykresu – (00t) dla powietrza wentylacyjnego wskazuje, że przy hipotetycznym całkowitym braku promieniowania słonecznego w ciągu dnia, ilość powietrza przepływającego przez budynek wynika jedynie z mocy wewnętrznego źródła ciepła i przyjmuje stałą wartość w czasie całej doby.



Rys. 8.7. Przegroda –13cm. Wymuszenie 0wt+, 00t. Dobowe przebiegi:

a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

Rysunek 8.8a przedstawia dobowe wahania temperatury i ilości powietrza przy wietrze przeciwnym w budynku z 10 cm izolacją. W przypadku temperatury wewnętrznej, podobnie jak przy wietrze wspomagającym, wartości ekstremalne, wyliczone z Modelu, wyprzedzają o kilka godzin te – otrzymane z symulacji numerycznych – (rys. 8.8a). Przepływ powietrza przez budynek, w przypadku rozwiązań analitycznych, jest jedynie bardzo silnie tłumiony. W sytuacji braku promieniowania

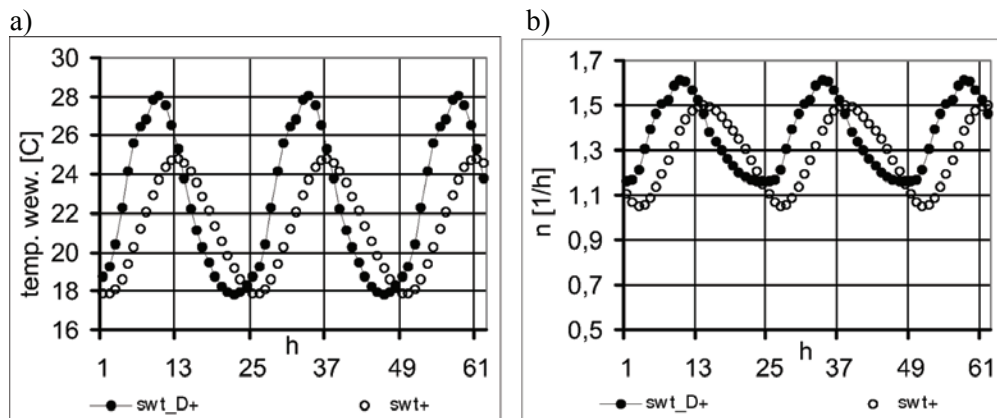


Rys. 8.8. Grubość – 13 cm. Wymuszenie swt-, 0wt-. Dobowe przebiegi:

a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

bezpośredniego, spadek ciśnienia, wywołowany wiatrem południowym, równoważy okresowo wypór termiczny wspomagany ciepłem z wewnętrznych źródeł i ciepłem pochodzącym z promieniowania rozproszonego. W tej sytuacji także ustaje przepływ powietrza wentylacyjnego. W tym samym czasie symulacje numeryczne wskazują na odwrócony przepływ powietrza – (rys. 8.8b). Przy całkowitym promieniowaniu słonecznym – (swt–), wypór termiczny z Modelu przewyższa spadek ciśnienia, wynikający z działania wiatru przeciwnego i obserwuje się niewielki przepływ powietrza, skierowany ku górze, a symulacje numeryczne wykazują przepływ odwrócony. Wykres powietrza – (swt–D), otrzymany z Modelu, wskazuje godzinę najmniejszej różnicy temperatur pomiędzy budynkiem i otoczeniem obiektu. Obserwowany jest wówczas spadek liczby wymian powietrza wentylacyjnego.

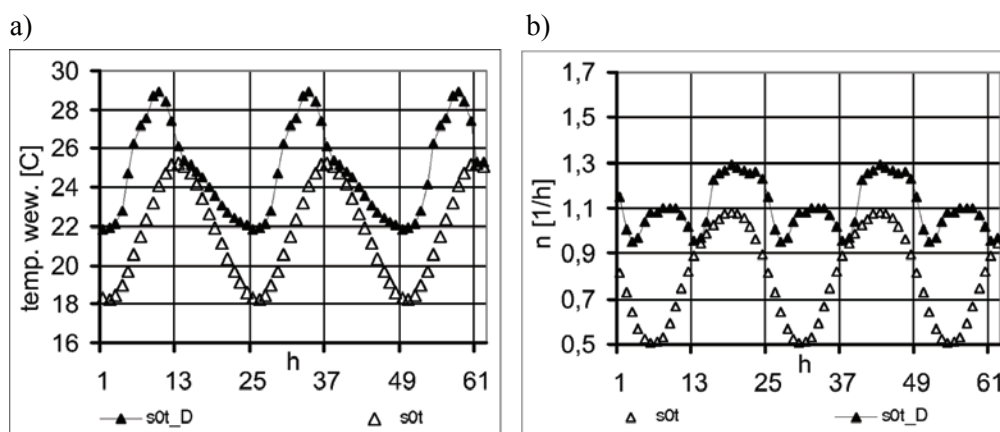
Rysunki 8.9–8.12 dotyczą ostatniej, rozpatrywanej wersji obiektu nr 2, a mianowicie obiektu o przegrodach zaizolowanych cieplnie 5 cm wełny mineralnej. Budynek ten charakteryzuje się czterokrotnie wyższym współczynnikiem przenikania ciepła, niż budynek 30 cm i dwukrotnie wyższym od budynku 13 cm. Współczynnik  $\beta$  jest odpowiednio – dwukrotnie i prawie trzykrotnie wyższy. Porównując dotychczasowe wyniki obliczeń dla pierwszych dwóch budynków można stwierdzić, że rozwiązanie analityczne uzyskane dla budynku o najniższym oporze cieplnym, którego wnętrze najłatwiej poddaje się wymuszeniu zewnętrznemu, jest najbardziej zbliżone w obliczonych przebiegach temperatury i powietrza do wyników symulacji numerycznych. Dotyczy to, co prawda tylko sytuacji w której wiatr wspomaga przepływ powietrza przez budynek – (swt+) i (0wt+); (rys. 8.9) i (rys. 8.11). Zbieżność, choć niecałkowita, jest widoczna zarówno w temperaturach, jak i strumieniu objętości powietrza. Przy wymuszeniu (swt+) i (0wt+) wiatr pełni rolę korektora.



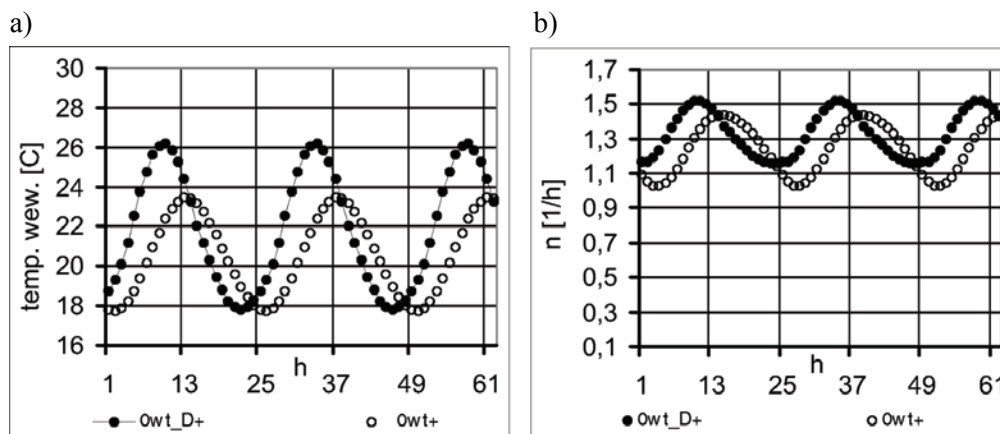
Rys. 8.9. Przegroda – 8 cm. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

Jego brak w wymuszeniu (s0t) i (00t) skutkuje niesymetrycznymi przebiegami dobowych temperatur wewnętrznych i ilości wymienianego powietrza – (rys. 8.10) i (rys. 8.12). Przesunięcia fazowe, pomiędzy wynikami otrzymywanymi z obu metod, są w tym wypadku najmniejsze. Szczególnie dotyczy to liczby wymian powie-

trza. Zjawisko to wynika z działania wiatru, a nie promieniowania słonecznego. Przesunięcie wiatru względem temperatury otoczenia wynosi parę godzin – (rys. 7.2.1). Sumy dobowe promieniowania, słonecznego padającego na kolejne okna, różnią się w wartościach i osiągają swoje maksima o różnym czasie, a zyski energetyczne wspomagają sukcesywnie wewnętrzne źródło ciepła, generując tym samym większy wypór termiczny, a więc i intensywniejszy przepływ powietrza przez budynek. Rozwiązanie analityczne przy wietrze przeciwnym dostarcza nierealnych wyników i nie jest prezentowane.



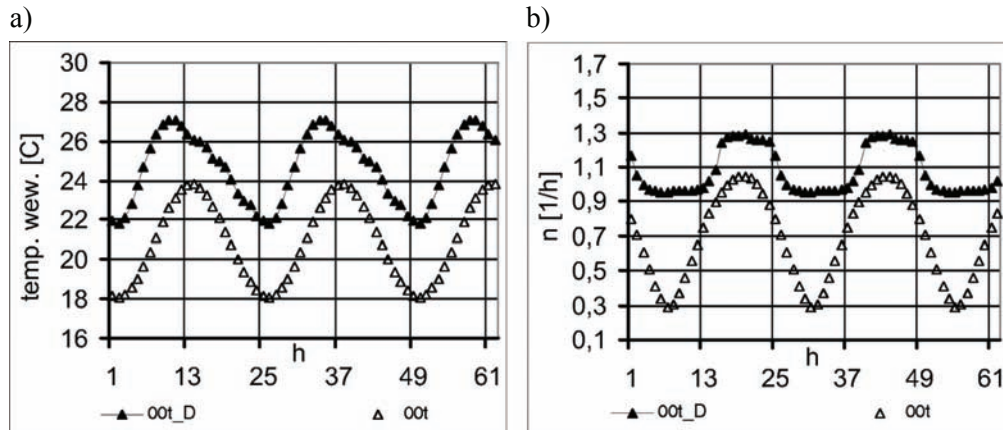
Rys. 8.10. Przegroda – 8 cm. Wymuszenie s0t. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza



Rys. 8.11. Przegroda – 8 cm. Wymuszenie 0wt+. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

Temperatura w pomieszczeniu sięga wówczas 60°C. Budynek izolowany zaledwie 5cm wełny mineralnej łatwiej wymienia ciepło z otoczeniem zewnętrznym, z racji

niższego oporu cieplnego przegród, niż budynki omawiane powyżej, dlatego trudno znaleźć uzasadnienie dla tak wysokich temperatur. Liczba wymian powietrza jest w tym wypadku znikoma.

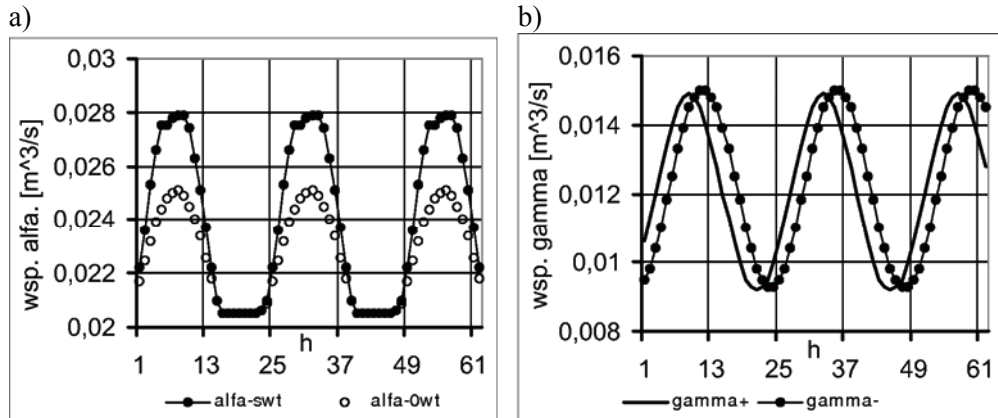


Rys. 8.12. Przegroda – 8 cm. Wymuszenie 00t. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury wewnętrznej, b) liczby wymian powietrza

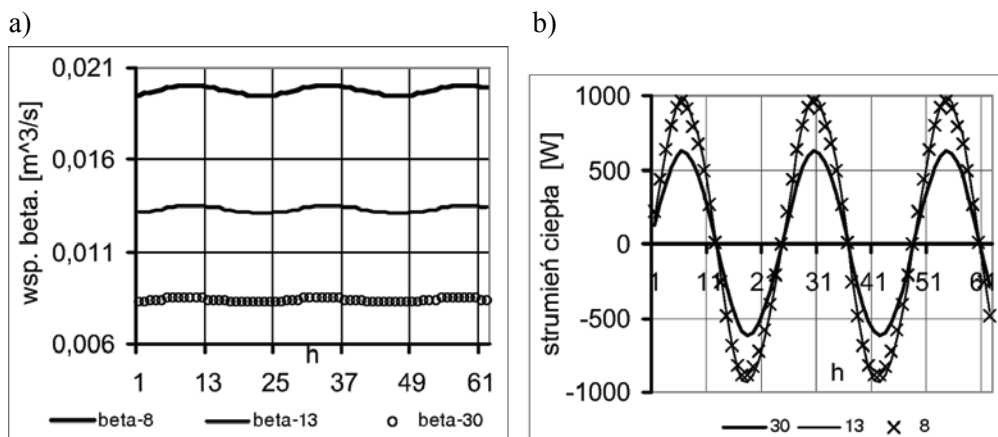
### 8.3. Podsumowanie wyników badań w budynku jednostrefowym

Wykresy na rys. 8.13a, 8.13b, 8.14a przedstawiają przebiegi godzinowych wartości współczynników  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , które są składowymi modelu Li, Delsante. Zmiana wartości dobowych współczynników wynika z wprowadzenia do równań charakterystyk harmonicznych parametrów pogody. Zmiany te nie są duże. Warto przyrzeć się zależnościom opisującym te trzy współczynniki.

Strumień objętości powietrza zależy w pierwszej kolejności od współczynnika  $\alpha$ , który opisany jest zależnością (5.9) –  $\alpha = (CA_{ef})^{2/3} (Bh)^{1/3}$ . W przedstawionych w bieżącym rozdziale badaniach zmianie ulega jedynie wartość wyporu termicznego  $B = Eg/\rho c_p T_o$ , gdzie  $E$  jest mocą źródła ciepła. Nie zmienia się powierzchnia otworów wentylacyjnych i ich odległość w pionie. Iloczyn  $\rho c_p$  ma – praktycznie biorąc – także stałą wartość. Zmienna jest jedynie wartość temperatury otoczenia  $T_o$  w czasie trwania doby. W toku dokonywanych przekształceń, prowadzonych dla uzyskania zależności opisującej strumień objętości powietrza wentylacyjnego, temperatura otoczenia przestaje ważyć w obliczeniach. Na rys. 8.13a widoczne są dwa wykresy. Wykres (swt) uzyskano przy całkowitym promieniowaniu słonecznym, którego zyski energetyczne dodają się do zysków energetycznych wewnętrznych źródeł ciepła  $E_i$ . W przypadku (0wt) jedynie promieniowanie rozproszone sumuje się z  $E_i$ . W omawianych budynkach, przy założeniu niezmięionej konfiguracji otworów wentylacyjnych, zmiana wartości objętościowego współczynnika wiatru wynika jedynie ze zmiany jego prędkości i jest jednakowa we wszystkich analizowanych tutaj budynkach.



Rys. 8.13 Dobowe przebiegi współczynnika objętościowego:  
a) wyporu termicznego –  $\alpha$ , b) generowanego działaniem wiatru –  $\gamma$



Rys. 8.14. Przebiegi dobowe:  
a) współczynnika objętościowego oporu cieplnego przegród –  $\beta$ ,  
b) strumienia ciepła zakumulowanego w przegrodach budynków

Rysunek 8.14a przedstawia zmiany wartości współczynnika  $\beta$ , który opisany jest zależnością (5.10) –  $\beta = \sum U_j A_j / 3\rho c_p$ . Wzrost tego współczynnika doprowadził do pewnego zbliżenia się wyników obliczeń. Stąd też wydaje się, że Model – w pierwszym rzędzie – opisuje obiekty o dużej kubaturze, takie jak hale lub budynki inwentarskie, a więc o dużej powierzchni obudowy i niskim oporze cieplnym przegród. Zmiany współczynnika zależą głównie od powierzchni przegród, a także wynikają ze strat ciepła przez te przegrody. Zwiększanie powierzchni przegród przynosi większy efekt, niż wzrost współczynnika przenikania.

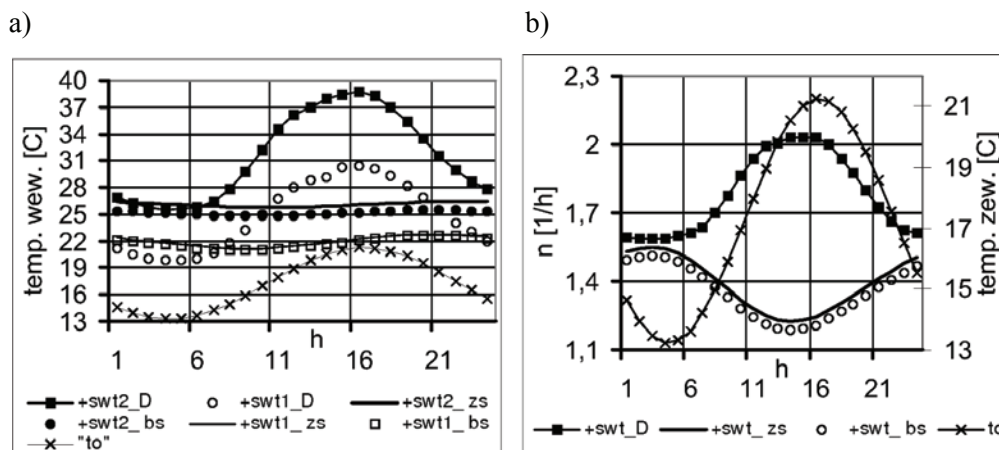
Rysunek 8.14b przedstawia strumień ciepła akumulowany w przegrodach analizowanych budynków, dla wymuszenia (swt+). Są to oczywiście wyniki uzyskane z symulacji numerycznych, ponieważ model Li, Delsante nie uwzględnia tego

zjawiska. Proces okresowego pozyskiwania i oddawania ciepła przez przegrody zewnętrzne budynku, mimo braku opisu w Modelu, odbywa się nieprzerwanie tak długo, jak długo występuje różnica temperatur pomiędzy kolejnymi warstwami materiału, temperaturą otoczenia oraz temperaturą wewnętrzną. Przy ścianach najgrubszych, z racji dużego oporu cieplnego, poza pierwszymi warstwami zewnętrznymi, występują bardzo niewielkie różnice temperatur w dalszych kolejnych warstwach. Przy ścianie grubości 8 cm różnice temperatur pomiędzy warstwami materiału są wyższe, stąd i akumulacja jest w tym budynku większa. Energia cieplna gromadzona w przegrodach budynku nie jest duża, w porównaniu z budynkiem wzniesionym z cegły, ale jej pominięcie w algorytmie obliczeniowym musi wpływać na poprawność wyników.

Porównanie wyników obliczeń uzyskanych obiema metodami sugeruje, że model Li, Delsante sprawdza się w ograniczonym zakresie i nie obejmuje budynków o bardzo wysokim oporze cieplnym ścian. Także w przypadku działania wiatru przeciwnego, wyniki znacznie odbiegają od tych, uzyskanych z symulacji numerycznej. Większą zgodność otrzymano w dziennych przebiegach temperatury wewnętrznej, niż w wymianie powietrza. Z racji dużych uproszczeń, Model nie jest w stanie opisać każdego jednostrefowego budynku. Jednak w niektórych przypadkach otrzymano wyniki przybliżone.

#### 8.4. Wyniki obliczeń w budynku dwustrefowym

Obliczenia procesów cieplno-przepływowych w budynku dwustrefowym, przy działającym wietrze wspomagającym, przeprowadzono w analogicznym porządku, jak dla budynku jednostrefowego. Przy wietrze przeciwnym uzyskano histerezę przepływu. Wykresy na rys. 8.15–8.20 przedstawiają dobowy przebieg temperatury wewnętrznej i liczby wymian powietrza w budynku z 27 cm warstwą izolacyjną,



Rys. 8.15. Przegroda – 30 cm. Wymuszenie swt+. Przebiegi dobowe:  
a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

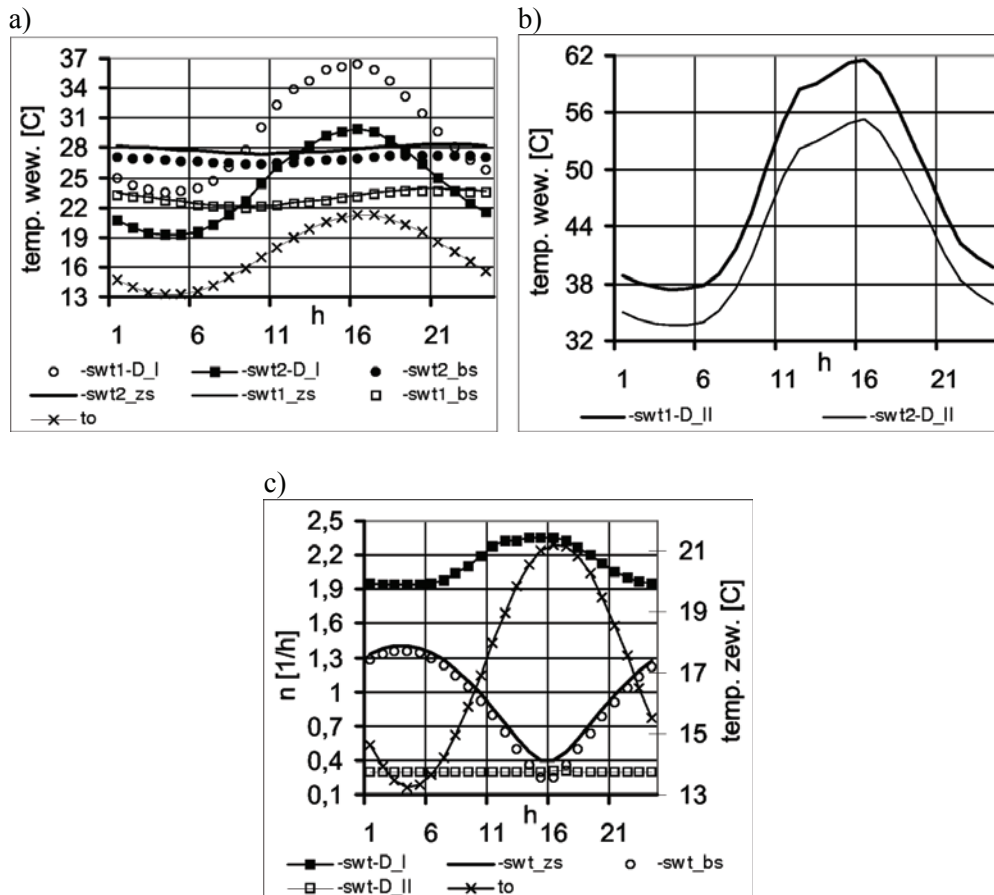
wykonaną z wełny mineralnej. Temperatury, które uzyskano z symulacji numerycznej, poza rozwiązaniem Modelu, podobnie jak w budynku jednostrefowym, dotyczą dwóch przypadków. Pierwszy przypadek, opatrzony rozszerzeniem „zs”, uwzględnia wpływ promieniowania słonecznego na przegrody nieprzezroczyste budynku, drugi – opatrzony rozszerzeniem „bs” – pomija jego wpływ. W strefie pierwszej różnica pomiędzy wartościami obu temperatur jest minimalna, a w strefie drugiej nie przekracza  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Dobowe zmiany w ilości przepływającego przez budynek powietrza są bardzo do siebie zbliżone – (rys. 8.15b). Różnice w wartościach obu liczonych parametrów są więc tego samego rzędu, jak w obiekcie jednostrefowym. Brak lub obecność absorpcji promieniowania słonecznego, przez ściany budynku o dużym oporze ciepła, ma niewielki wpływ na wartość temperatury i wymianę powietrza. Przebieg temperatur w obu strefach budynku, otrzymany z rozwiązania Modelu – (5.49), determinują w dużej mierze wahania dobowe temperatury otoczenia. Stąd też wartość amplitudy obu temperatur jest nieporównanie większa od tych, uzyskanych z jednowymiarowego przewodnictwa ciepła. I, podobnie jak w budynku jednostrefowym, maksymalną wartość strumienia objętości powietrza wentylacyjnego, obliczaną według Modelu, osiąga się przy najwyższej wartości temperatury otoczenia. Dużą zbieżność temperatur, obliczonych obiema metodami, uzyskuje się przed wschodem słońca. To samo spostrzeżenie, choć w węższym zakresie, można odnieść do liczby wymian powietrza. W nocy następuje ubytek strumienia ciepła zakumulowanego w przegrodach ciepła i model numeryczny „zbliża się” do Modelu, który pomija występowanie tego procesu w przegrodach. Brak zmiennych zysków słonecznych i postępująca stabilizacja temperatury otoczenia, zbliża zachodzące w budynku procesy do stanu ustalonego.

Rysunek 8.16a, b, c przedstawia procesy ciepłno-przepływowe w budynku z izolacją także 27 cm, które zachodzą pod wpływem wiatru przeciwnego, tj. południowego. Zbieżność i rozbieżność w przebiegach temperatur w strefach budynku (swt–) mają ten sam charakter, co przy wietrze wspomagającym – (rys. 8.16a). Dodatkowo, otrzymano z rozwiązania równania (5.50) temperatury w strefach i liczbę wymian powietrza, które opatrzone symbolem (–swtD\_II). Uzyskane z tego rozwiązania temperatury są niezwykle wysokie i charakteryzują się bardzo dużą amplitudą. Brak wyraźnych zmian w wahaniami dobowych ilości wymienianego powietrza, wskazuje na tłumiącą rolę wiatru południowego.

Z rozwiązania (–swtD\_I) jak i (–swtD\_II) otrzymuje się wyższą temperaturę w strefie pierwszej, niż drugiej. Relacja jest odwrotna jak przy wnikach (+swt\_D\_I) i (+swtD\_II). Temperatury, uzyskane z symulacji numerycznych przy wietrze przeciwnym, zachowują nie zmienioną gradację. Są jednak wyższe w porównaniu z tymi, które występują przy wietrze wspomagającym.

Przy rozwiązaniu numerycznym, spadek wymiany powietrza w obiekcie występuje z nieznacznym wzrostem temperatury zewnętrznej, a właściwie wraz ze spadkiem różnicy gęstości powietrza wewnętrznego i zewnętrznego. W dwustrefowym Modelu, podobnie jak w jednostrefowym, ilość wymienianego powietrza określa m.in. współczynnik  $\alpha$ , ale jego wartość w rzeczywistości determinuje wypór termiczny  $B$  – ( $B_1$  i  $B_2$ ). W ciągu doby wartość  $B$  nie jest stała z racji zmiennych ener-

getycznych zysków słonecznych. Wypór – B osiąga najwyższą wartość w południe, kiedy całkowite zyski energetyczne są najwyższe.

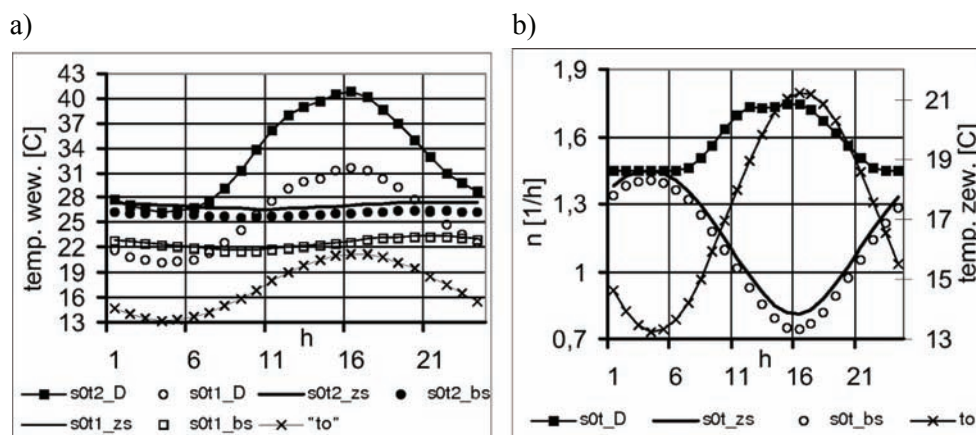


Rys. 8.16. Przegroda – 30 cm. Wymuszenie swt-. Przebiegi dobowe temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ :

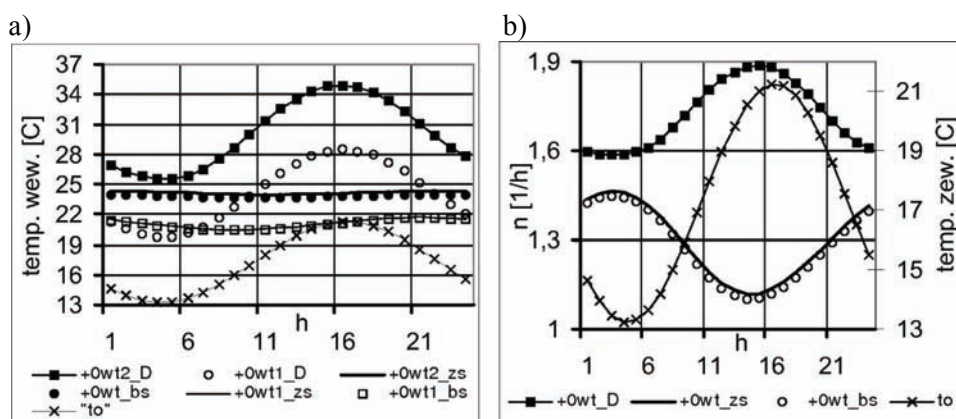
a)  $\dot{V} = 20$ , b)  $\dot{V} = 0,001$ , c) dla  $\dot{V} = 20$  oraz  $\dot{V} = 0,001$

Następny przypadek, który dotyczy tego samego obiektu, pomija wpływ bezpośredniego promieniowania słonecznego – (rys. 8.18). Przy wietrze wspomagającym uzyskane temperatury są niższe, wymiana powietrza intensywniejsza, w porównaniu z przypadkiem (s0t) – (rys. 8.17). Z symulacji numerycznych, przy wymuszeniu (0wt+), w obu opcjach obliczeniowych, otrzymane wyniki wskazują na okresowy spadek intensywności wymianianego powietrza – (rys. 8.18b). W Modelu, z racji przyjętych warunków początkowych, w postaci średnich pogodowych oraz mocy cieplnej źródeł ciepła, występują zjawisko odwrotne. Oba rozwiązania D\_I i D\_II przedstawione na rys. 8.19b i c, różnią się znacznie pomiędzy sobą. Różnią się także od rozwiązania numerycznego.





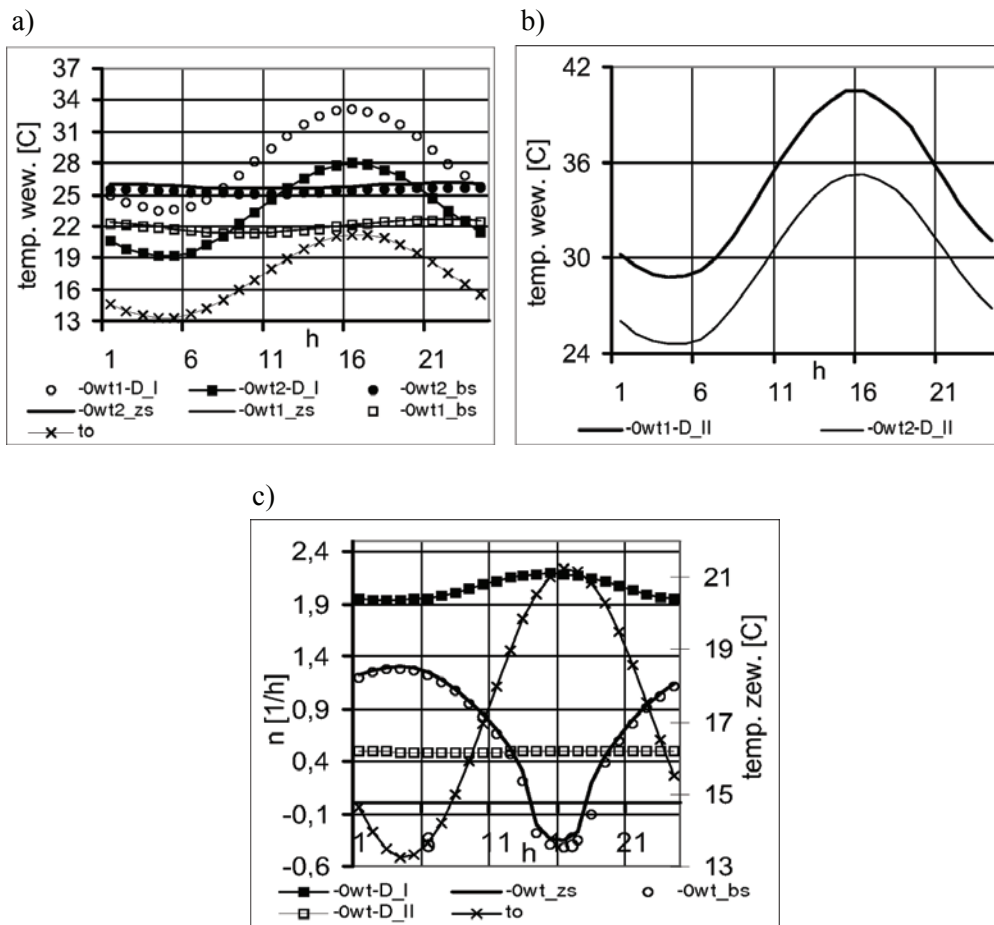
Rys. 8.17. Przegroda – 30 cm. Wymuszenie s0t. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza



Rys. 8.18. Przegroda – 30 cm. Wymuszenie 0wt+. Dobowe przebiegi:  
a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

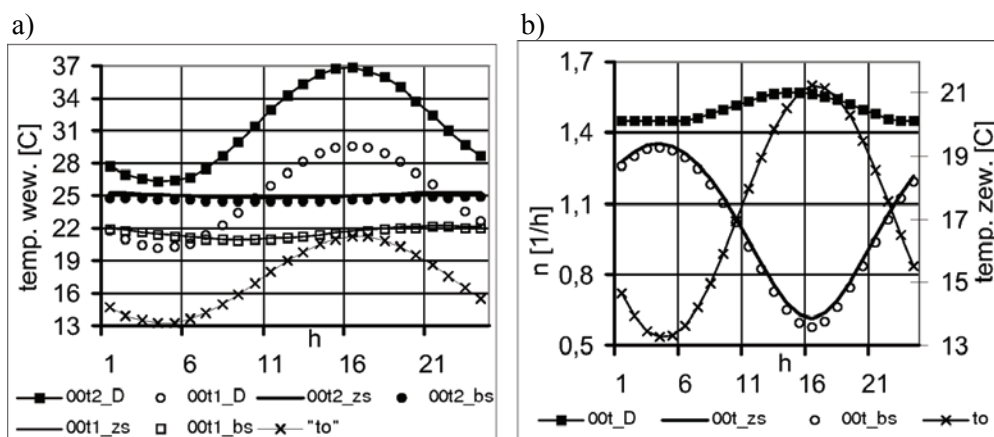
Dotyczy to zarówno temperatur w strefach – (rys. 8.19a), jak i liczby wymian przepływającego przez budynek powietrza – (rys. 8.19c). W omawianym rozwiązaniu uwzględniane jest jedynie promieniowanie rozproszone.

Porównanie dobowych przebiegów D\_I, na rys. 8.18b i rys. 8.19c, wykazuje wpływ prędkości wiatru na intensywność wymianianego powietrza. Wiatr południowy – tłumiący, osiąga wyższą prędkość na wysokości 7 m nad powierzchnią niż wspomagający – północny na wysokości 1 m. Wpływ wyporu termicznego, który jest w obu przypadkach identyczny, gra tu drugoplanową rolę, ponieważ strumień powietrza przy wietrze wspomagającym jest niższy, niż przy wietrze tłumiącym. Rozwiązanie numeryczne nie pokrywa się, także tym razem, z wynikiem otrzymanym z Modelu. Co się tyczy rozwiązania opatrzonego symbolem (-0wtD\_II), to temperatury osiągane w strefach są niższe w porównaniu z (-swtD-II), z racji braku oddziaływania promieniowania bezpośredniego.



Rys. 8.19. Przegroda – 30 cm. Wymuszenie 0wt–. Przebiegi dobowe temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$  budynku:   
 a) rozwiązanie dla  $\dot{V} = 20$ , b) rozwiązanie dla  $\dot{V} = 0,001$ , liczby wymian powietrza   
 c) rozwiązanie dla  $\dot{V} = 20$  oraz  $\dot{V} = 0,001$

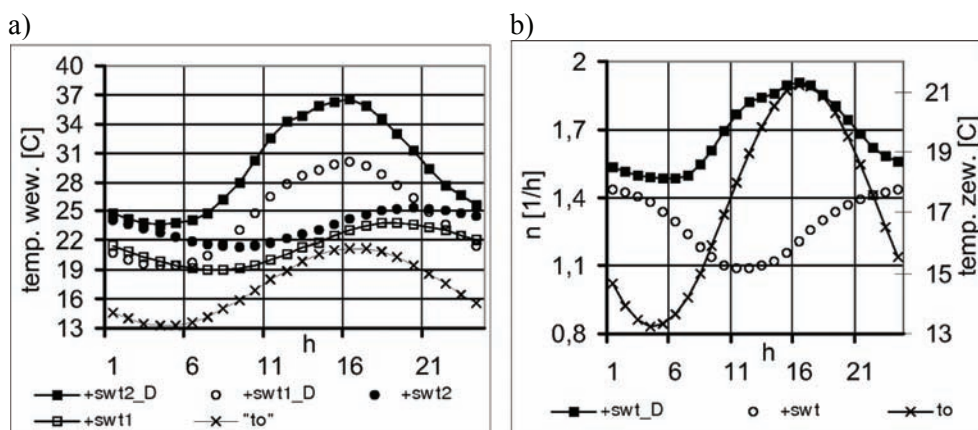
Wykresy z rys. 8.20 są wynikiem wymuszenia ograniczonego do różnicy temperatur i promieniowania rozproszonego. W powyżej omawianych rozwiązaniach otrzymuje się ponownie z symulacji numerycznych w godzinach południowych, przy najniższej różnicy temperatur – wewnętrznej i otoczenia, najniższą wymianę powietrza, mimo wzmożonego wyporu termicznego. Rozwiązanie (00t+D) potwierdza fakt, że w modelu Li, Delsante zmiana temperatury otoczenia nie wpływa istotnie na ilość przepływającego przez budynek powietrza. Brak bezpośredniego promieniowania słonecznego powoduje, że moc źródła ciepła zmienia się w ciągu dnia niewiele, stąd uzyskuje się dość wyrównaną wymianę powietrza przez całą dobę. Dodatkowo dzień jest bezwietrzny, więc prędkość wiatru nie wpływa na ten proces.



Rys. 8.20. Przegroda – 30 cm. Wymuszenie 00t. Dobowe przebiegi:

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

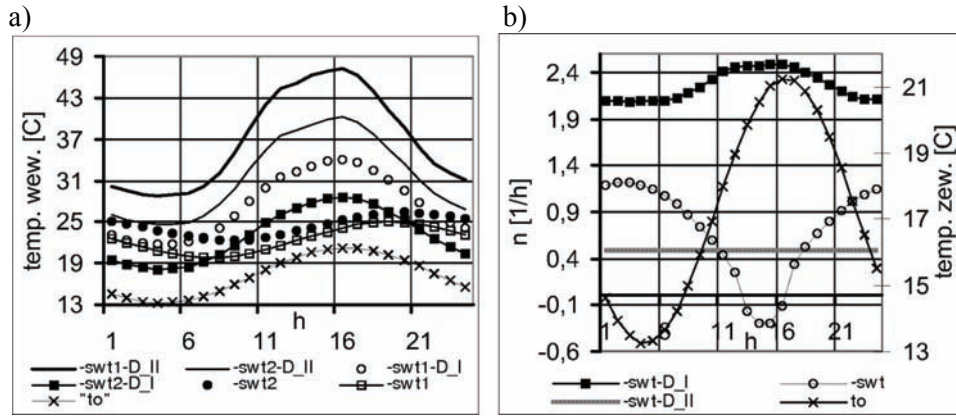
Kolejne wykresy na rys. 8.21–8.26 przedstawiają dobowe przebiegi temperatur w strefach oraz całkowitą liczbę wymian powietrza wentylacyjnego w budynku, którego grubość przegród zewnętrznych wynosi 13 cm, a izolacja cieplna 10 cm. Uzyskane z symulacji numerycznych temperatury, z racji wyższego współczynnika przenikania ciepła, są niższe niż w budynku z izolacją 27 cm. Przy niższym oporze cieplnym przegród, wewnątrz budynku jest bardziej podatne na wpływ temperatury zewnętrznej. Rozwiązania numeryczne charakteryzują się wyraźnie zaznaczoną amplitudą temperatur. Występuje tu ponadto mniejsza różnica pomiędzy temperaturami w strefach – (rys. 8.21a – rys. 8.26a). W rozwiązaniu modelu Li, Delsante wartość współczynników  $\beta$  rośnie tak, jak rośnie współczynnik przenikania ciepła, a więc i temperatury w strefach budynku są niższe. Przepływ powietrza nieznacznie maleje, z racji mniejszej różnicy temperatur pomiędzy wnętrzem, a otoczeniem budynku –



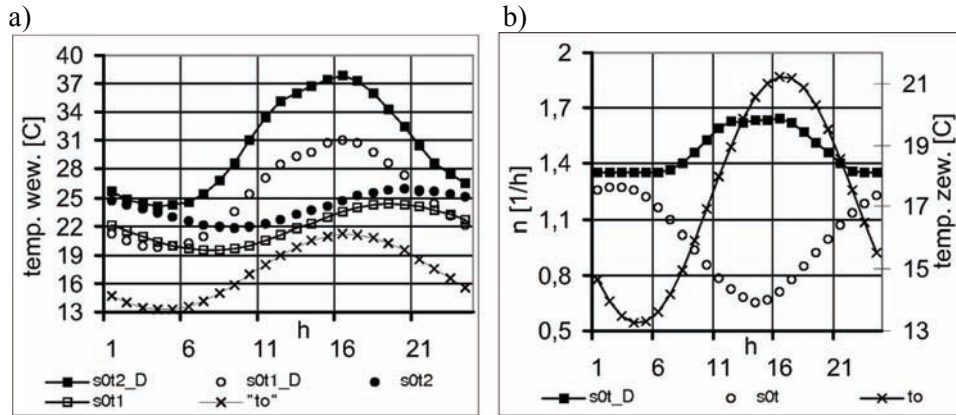
Rys. 8.21. Przegroda – 13 cm. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi:

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ ,

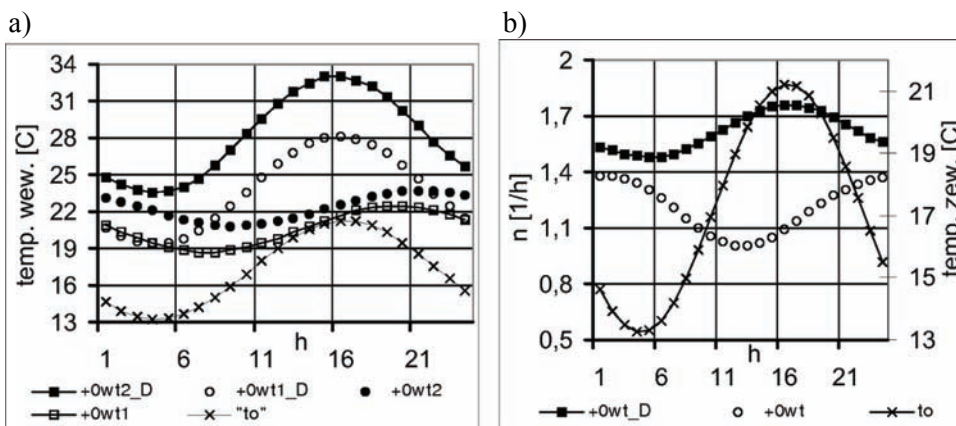
b) liczby wymian powietrza



Rys. 8.22. Przegroda – 13 cm. Wymuszenie swt-. Dobowe przebiegi:

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

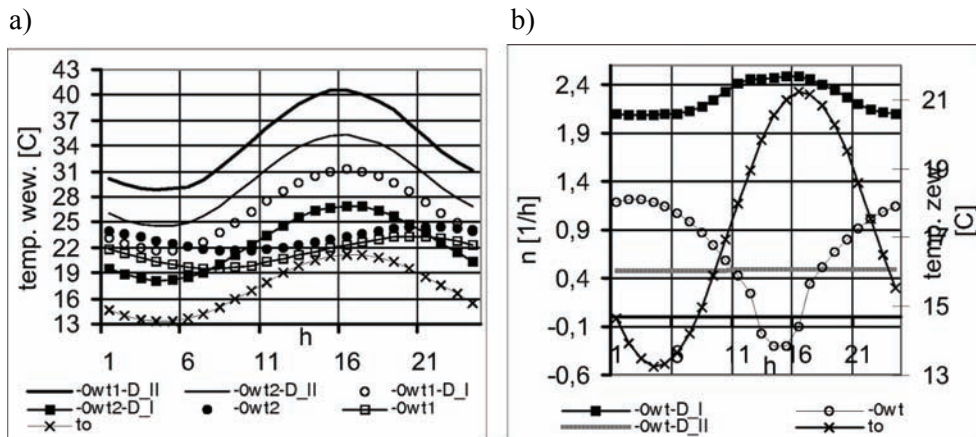
Rys. 8.23. Przegroda – 13 cm. Wymuszenie s0t. Dobowe przebiegi:

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

Rys. 8.24. Przegroda – 13 cm. Wymuszenie 0wt+. Dobowe przebiegi:

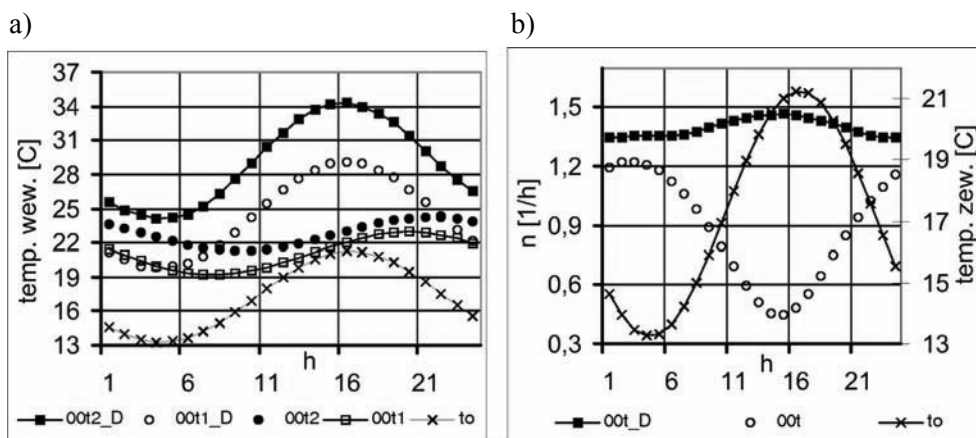
a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

(rys. 8.21b–rys. 8.26b). W przypadku rozwiązania numerycznego, minima strumienia objętości powietrza występują we wcześniejszych godzinach niż ma to miejsce w budynku o wyższym oporze cieplnym ścian. Przesunięcie to dochodzi do 5 godzin. W rozwiązaniach uzyskanych z Modelu, nie obserwuje się tego procesu.



Rys. 8.25. Przegroda – 13 cm. Wymuszenie 0wt-. Dobowe przebiegi:

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza



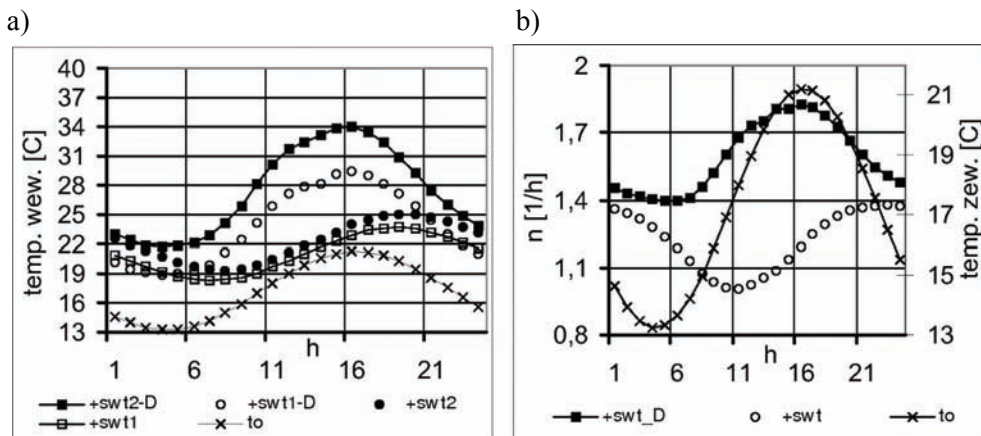
Rys. 8.26. Przegroda – 13 cm. Wymuszenie 00t. Dobowe przebiegi:

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

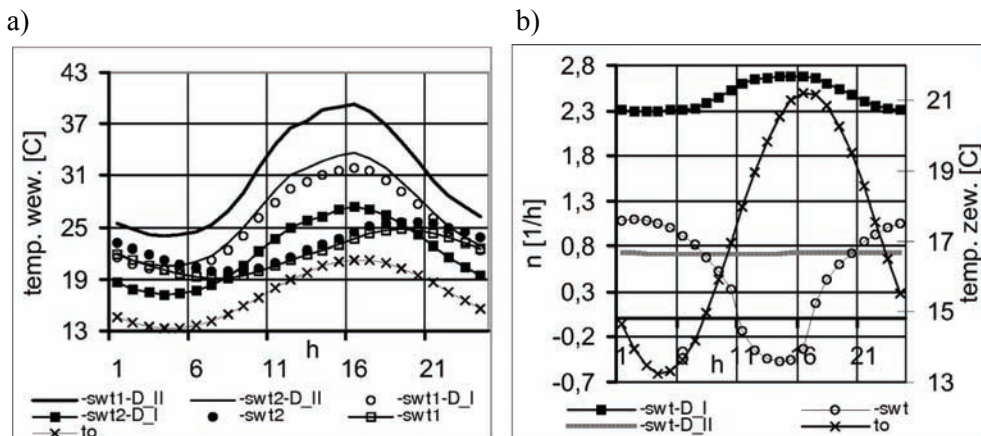
W przypadku wiatru przeciwnego – (swt-); (rys. 8.22) uzyskano wielokrotne miejsca zerowe. Wykresy (-swtD\_I) i (-swtD\_II) przedstawiają analogiczną sytuację do tej na rys. 8.16. Także rys. 8.25 przedstawia histerezę przepływu dla przypadku (0wt-), przy wietrze przeciwnym. Charakter wykresów jest podobny do tych uzyskanych dla budynku o ścianach 30 cm – (rys. 8.16). Podobnie, największa zgodność wyników występuje w godzinach od zachodu do wschodu słońca, z powodów omówionych przy obiekcie izolowanym ciepłnie 27 cm wełny.

Rysunki 8.27–8.32 odnoszą się do ostatniego z analizowanych budynków. Grubość przegród zewnętrznych wynosi 8 cm wraz z 5 cm izolacją cieplną.

Budynek ten ma najniższy opór przenikania ciepła spośród wszystkich trzech obiektów. Zachodzi więc w nim najbardziej intensywna wymiana ciepła przez przegrody. Jak wiadomo w Modelu miarą intensywności tego procesu jest, wartość współczynnika  $\beta$ . W tym budynku, współczynnik osiąga wartość najwyższą.



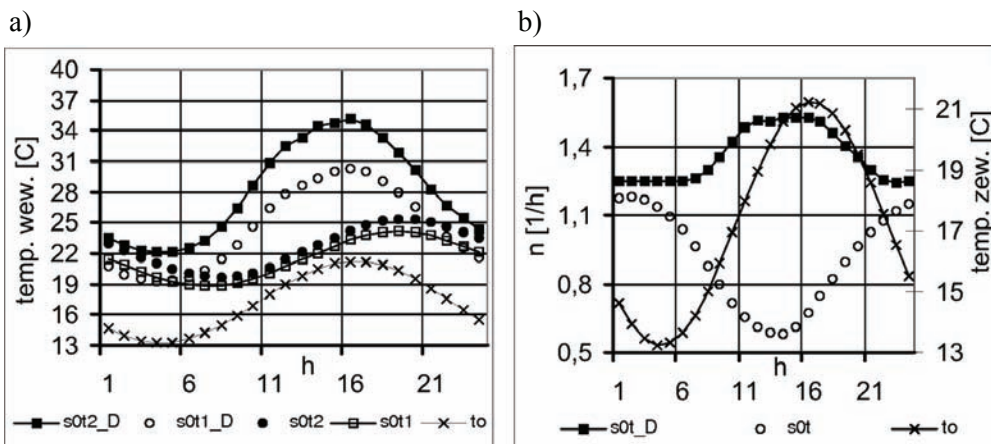
Rys. 8.27. Przegroda 8 cm. Wymuszenie swt+. Dobowe przebiegi a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza



Rys. 8.28. Przegroda 8 cm. Wymuszenie swt-. Dobowe przebiegi a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

Obliczone obciążenia metodami temperatury w strefach wykazują, w porównaniu z poprzednimi obiektami, najmniejszą różnicę pomiędzy sobą, podobnie jak w budynku jednostrefowym. W okresie od zachodu do wschodu słońca wartości temperatur, uzyskanych z jednowymiarowego przewodnictwa ciepła, wręcz pokrywają się z temperaturami Modelu.

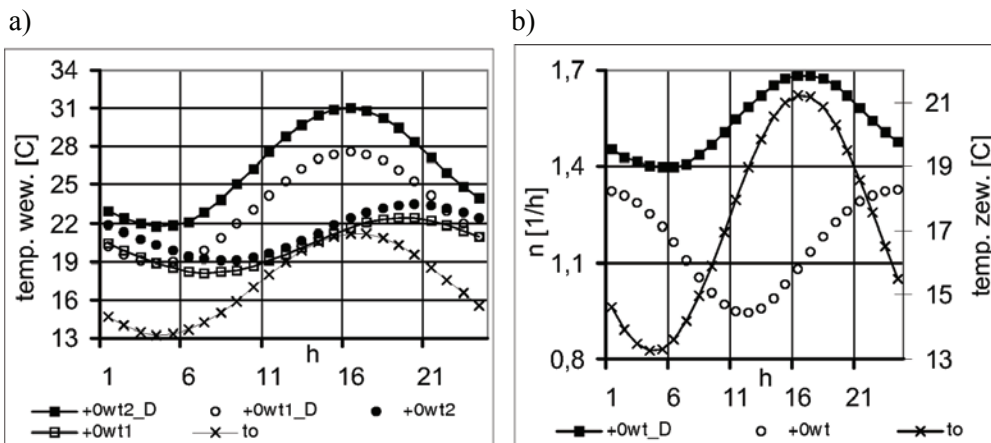
Wiatr przeciwny generuje przepływy  $(-swt-D_{I/II})$  oraz  $(-0wt-D_{I/II})$  – (rys. 8.28) i (rys. 8.31) uzyskane z rozwiązania równania (5.51) dla wartości początkowej strumienia objętości powietrza, równej  $\dot{V} = 0,001$ . Charakteryzują się one bardzo niewielkimi zmianami ilości powietrza wentylacyjnego. Niewielkie zmiany w wymianie powietrza, w porównaniu z rozwiązaniami otrzymanymi dla wartości początkowej  $\dot{V} = 20$ , wynikają – jak w pozostałych budynkach – z tłumienia przepływu wiatrem przeciwnym, który niweluje okresowo działanie wyporu termicznego. Przy wietrze przeciwnym, tak samo, jak w pozostałych dwóch budynkach z rozwiązania Modelu, temperatura w strefie pierwszej przewyższa temperaturę w strefie górnej.



Rys. 8.29. Przegroda – 8 cm. Wymuszenie  $s0t$ . Dobowe przebiegi:

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ ,

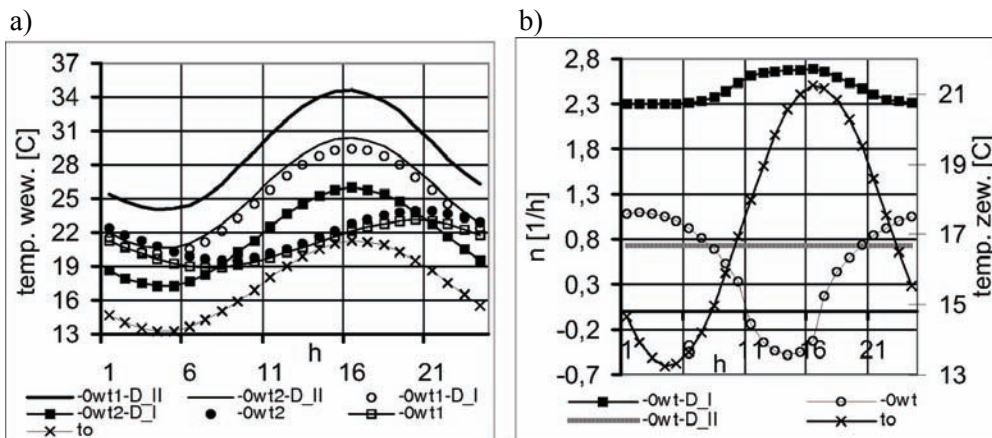
b) liczby wymian powietrza



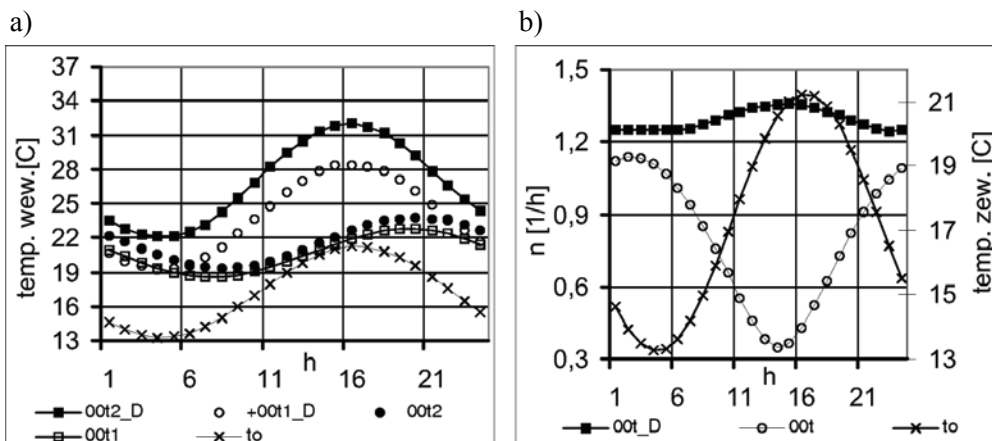
Rys. 8.30. Przegroda – 8 cm. Wymuszenie  $0wt+$ . Dobowe przebiegi:

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$  wewnętrznej,

b) liczby wymian powietrza



Rys. 8.31. Przegroda – 8 cm. Wymuszenie 0wt-. Dobowe przebiegi:

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

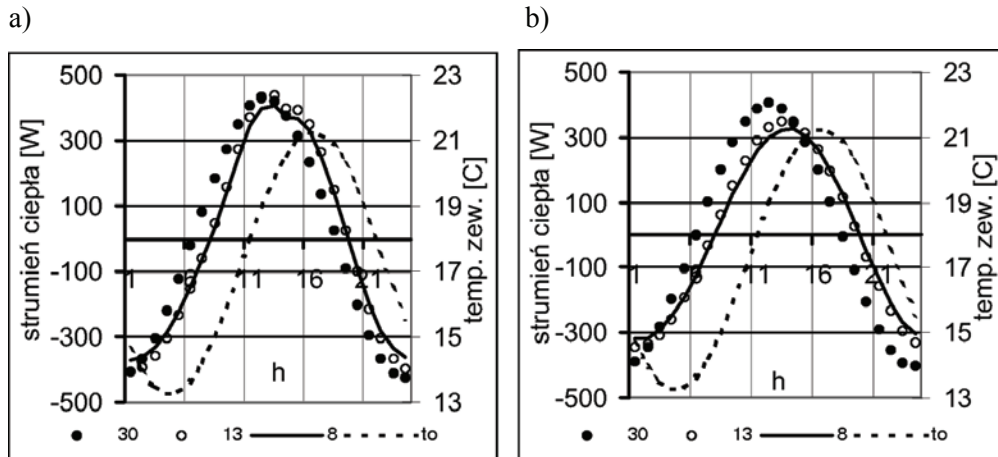
Rys. 8.32. Przegroda – 8 cm. Wymuszenie 00t. Dobowe przebiegi:

a) temperatury w strefie pierwszej –  $t_1$  i drugiej –  $t_2$ , b) liczby wymian powietrza

Rysunek 8.33 pokazuje dobowe przebiegi strumienia ciepła akumulowanego we wszystkich trzech budynkach o różnej grubości przegród zewnętrznych, przy wymuszeniu (swt+) oraz (0wt+). Moc cieplna, zakumulowana w budynkach w ciągu doby, nie różni się znacznie od siebie. Są to wartości otrzymane oczywiście z symulacji numerycznych, ponieważ model Li, Delsante pomija proces akumulacji. Niezwykle różnice wynikają z różnic strumienia ciepła pomiędzy warstwami przegród zewnętrznych budynków. Wykresy wskazują, że mimo spadku oporu przenikania ciepła, akumulacja w budynkach nie zmienia się istotnie. Gęstość materiału i jego ciepło właściwe jest identyczne. Chociaż strumień ciepła, zakumulowany w budynkach lekkich nie jest duży, w porównaniu np. z tym zgromadzonym w budynku

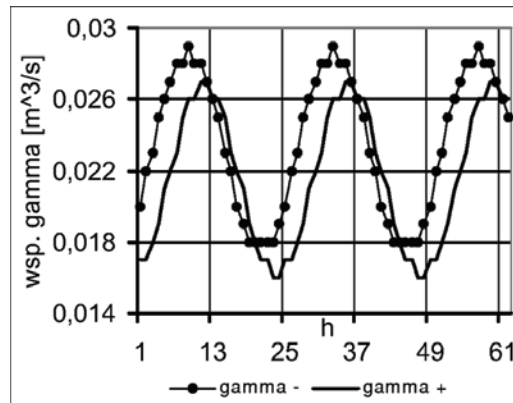


zbudowanym z cegieł, to jednak wpływa na przebieg procesu wymiany ciepła i powietrza w obiekcie.



Rys. 8.33. Dobowe przebiegi strumienia ciepła akumulowanego w badanych obiektach budowlanych:  
a) 0wt+, b) 0wt+

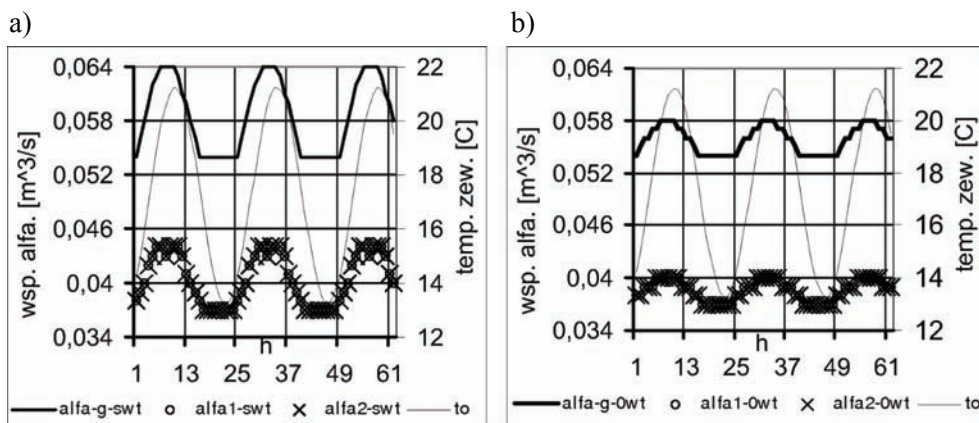
Brak słońca – (0wt+D) w sposób oczywisty obniża wartość temperatury wewnętrznej ale, w większym stopniu, niż przy wymuszeniu (0wt+). Efekt ten spowodowany jest ponownie pominięciem akumulacji ciepła w przegrodach.



Rys. 8.34. Dobowe przebiegi objętościowego współczynnika  $\gamma$  generowanego wiatrem wspomagającym (+) i przeciwnym (-)

Rysunek 8.34 przedstawia dobowe wahania objętościowego współczynnika  $\gamma$ , generowanego wiatrem wspomagającym – północnym, oraz wiatrem przeciwnym – południowym. Współczynnik  $\gamma$ , jak wiadomo, wpływa na strumień objętości

powietrza wentylacyjnego. Wartość współczynnika, który jest generowany przez wiatr południowy, ma wyższą wartość od współczynnika generowanego wiatrem północnym. Otwór na ścianie południowej znajduje się 7 m nad powierzchnią gruntu, a na stronie północnej na wysokości 1m. Wpływ chropowatości terenu na prędkość wiatru na wysokości otworu południowego, jest więc niższy, niż przy otworze północnym – tablica 6.5. Wykresy z rys. 8.35 przedstawiają dobowe przebiegi termicznego współczynnika objętościowego  $\alpha$ , którego wartość zależy od wyporu termicznego, a ten z kolei jest wprost proporcjonalny do całkowitej mocy źródeł ciepła, a odwrotnie proporcjonalny do temperatury otoczenia. W budynku dwustrefowym współczynnik przypisany jest każdej ze stref,  $\alpha_1$  odnosi się do strefy dolnej budynku, a  $\alpha_2$  – do górnej. Z kolei  $\alpha_g$ , określa sumaryczną wartość współczynnika, przy przepływie powietrza skierowanym do góry. Jak wiadomo, ten kierunek przepływu występuje zawsze przy wietrze wspomagającym ale może pojawiać się także przy wietrze przeciwnym. Rysunek 8.35a odnosi się do całkowitego promieniowania słonecznego, a rys. 8.35b – do rozproszonego.



Rys. 8.35. Dobowe przebiegi współczynnika wyporu termicznego –  $\alpha$  :  
a) swt+, b) 0wt+

Przy przyjętych wymuszeniach wydatek energetyczny wewnętrznych źródeł ciepła, jest identyczny w obu algorytmach. Ale w symulacjach numerycznych, promieniowanie słoneczne pozyskiwane przez okno, w pierwszej fazie ogrzewa przegrody i akumuluje w nich ciepło, a następnie ciepło to w części oddawane przez ściany, ogrzewa powietrze wewnętrzne. Pominięcie w modelu Li, Delsante akumulacji ciepła zaburza poprawny opis zjawiska. W Modelu ściany nie tonizują dobowych wahań temperatury wewnętrznej. Twórcy Modelu założyli zapewne, że z racji niskiej pojemności cieplnej przegród, analiza procesów ciepło-przepływowych w budynku lekkim może pomijać proces akumulacji. Podobnie jak to, że można pominąć oddziaływanie promieniowania słonecznego na ściany i dach obiektu. Jak wynika z wykresów przedstawionych na rys. 8.1–8.6, założenie jest uzasadnione w przypadku obiektów o konstrukcji szkieletowej, izolowanych materiałem o dużym oporze cieplnym przegród.

### 8.5. Podsumowanie wyników badań w budynku dwustrefowym

Podany przez Li, Delsante model trudno uznać za doskonały, ale jest on jedną z niewielu prób, matematycznego opisu wymiany powietrza w obiektach budowlanych wyposażonych w wentylację naturalną, w którym intensywność przepływu powietrza wynika także z izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych. Nie dotyczy to symulacji CFD.

Najistotniejszą cechą Modelu jest to, że pod pewnymi warunkami uzyskiwane jest rozwiązanie analityczne, które może stanowić podstawę do interpretacji badań laboratoryjnych. Model zezwala ponadto na badanie przepływów powietrza przy wiatrach przeciwnych.

Należy zauważyć, że literatura przedmiotu dostarcza przykładów rozwiązań, w których wymiana powietrza powiązana jest z procesem wymiany ciepła pomiędzy budynkiem, a jego otoczeniem, a celem jest uzyskanie odpowiedzi na kompleksowe zapotrzebowanie ciepła. W rozwiązaniach tych modeli zakładana jest a priori stała temperatura powietrza. Podany przez Li, Delsante model natomiast pomija konieczność tego założenia.

Porównanie wyników obliczeń, uzyskanych obiema metodami sugeruje, że model Li, Delsante sprawdza się w ograniczonym zakresie i nie obejmuje budynków o bardzo wysokim oporze cieplnym ścian. Także w przypadku działania wiatru przeciwnego wyniki znacznie odbiegają od tych, uzyskanych z symulacji numerycznej. Większą zgodność otrzymano w dziennych przebiegach temperatury wewnętrznej, niż w wymianie powietrza. Z racji dużych uproszczeń Model nie jest w stanie opisać każdego dwustrefowego budynku. Nie mniej, w niektórych przypadkach otrzymano wyniki przybliżone.

Zmniejszenie warstwy izolacyjnej w analizowanych budynkach wynikało z założenia, że przy niskiej, ale realnej grubości materiału, osiągnięta zostanie przybliżona zgodność wyników uzyskanych z obu algorytmów obliczeniowych.



## 9. Podsumowanie i wnioski

Wynikiem badań niustalonych procesów cieplno-przepływowych, przeprowadzonych w budynkach jednostrefowych i budynkach dwustrefowych z naturalną wentylacją, jest wykazanie zależności pomiędzy intensywnością naturalnej wymiany powietrza i temperaturą wewnętrzną a strukturą materiałową oraz pojemnością przegród zewnętrznych. Dane dotyczące badanych budynków zawierają tablice 6.1–6.3.

Powód, dla którego podjęto próbę badania niustalonych stanów wymiany ciepła i powietrza w obiektach budowlanych z naturalną wentylacją, wiąże się z problemami związanymi z odprowadzaniem nadmiaru ciepła w okresie letnim z budynków o dużym oporze przegród zewnętrznych. Zagadnienia, w tym wentylacja hybrydowa, związane z tym procesem nie leżą w uwadze i zainteresowaniu architektów. Problem sprowadzany jest do instalacji klimatyzatorów. Zdolność określenia wpływu własności termicznych przegród budynku na strumień objętości powietrza wentylacyjnego i stąd na wysokość temperatury wewnętrznej, wymaga zaawansowanej wiedzy od architekta, gdyż w dalszym ciągu, mimo rozwoju badań nad wentylacją naturalną, stosowane są rozwiązania tradycyjne [95, 97].

Budynek w naszym klimacie postrzegany jest przez pryzmat zapotrzebowania na ciepło w sezonie grzewczym a usuwanie nadmiaru ciepła jest lekceważone. Przy nowych technologiach budowlanych i znacznym przeszkleniu budynków proces ten musi być zauważany zarówno z uwagi na komfort cieplny pomieszczeń, jak i na koszty ponoszone z tytułu jego zapewnienia. W wyniku działań, podejmowanych na rzecz ochrony naturalnego środowiska, wśród których znajduje się obniżanie zapotrzebowania na energię potrzebną do ogrzewania budynków, występuje wzmożone zainteresowanie wentylacją hybrydową. Wymiana powietrza wentylacyjnego, która wynika z działania sił przyrody, może otrzymać wsparcie mechaniczne w niesprzyjających warunkach pogodowych.

Sezon grzewczy w naszym klimacie trwa długo, bo zazwyczaj od października do połowy kwietnia. Jest ponadto kosztowny i właśnie ten okres determinuje nasze postrzeganie obiektów budowlanych. Poza sezonem grzewczym nie ponosimy kosztów ogrzewania, natomiast często musimy ponosić koszty związane z odprowadzeniem nadmiaru ciepła z budynków. W sezonie grzewczym temperatura wewnętrzna jest pochodną dostarczonego ciepła, które pokrywa straty ciepła z budynku o wiadomym oporze cieplnym przegród. Dotyczy to także strat ciepła spowodowanych wymianą powietrza wentylacyjnego, gdzie liczbę wymian – w zależności od przeznaczenia budynku – określa norma. Tak więc w sezonie grzewczym zakłada się, że wymiana powietrza w obiektach budowlanych, niezależnie od ich struktury materiałowej, spełnia wymagania normy zarówno w zakresie oczekiwań higienicznych, jak i cieplnych. W sezonie grzewczym nie występuje, poza sporadycznymi

przypadkami, problem odprowadzenia nadmiaru ciepła z pomieszczenia, gdyż kwestię tę rozwiązuje regulowany układ grzewczy pracujący w mniej lub bardziej ustalonych warunkach. Kładąc główny nacisk na ograniczenie zużycia ciepła, pomija się lub lekceważy konieczność odprowadzania wilgoci i zanieczyszczeń z pomieszczeń. Ponieważ jednak, niezależnie od pory roku, wentylacja jest niezbędna nie tylko ze względów higienicznych, może być proponowany w okresach letnich, dla budynków szczelnych, system naturalnej wymiany powietrza w układzie hybrydowym.

Wyróżnikami, analizowanych w pracy budynków, są opory cieplne przegród zewnętrznych, o przyjętej strukturze materiałowej i grubości. Wartość temperatury wewnętrznej i ilość przepływającego przez budynek powietrza wynika z intensywności zachodzenia procesu wymiany ciepła pomiędzy wnętrzem a otoczeniem budynku. Z jednej strony intensywność procesu przenikania ciepła przez przegrody budynku determinuje wartość temperatury wewnętrznej, a tym samym deficyt gęstości powietrza, który generuje przepływ powietrza przez budynek. Z drugiej zaś przepływ powietrza wpływa na wartość temperatury wewnętrznej, a tym samym – na intensywność wymiany ciepła przez przegrody. Intensywność zachodzenia procesu zależy więc i od różnicy temperatur i od oporu cieplnego ściany. Jego wartość, przy założeniu stałych współczynników przejmowania ciepła (różnych dla przegród pionowych i poziomych), determinuje współczynnik przewodzenia ciepła. Dodatkowy wpływ na te procesy ma akumulacja ciepła w przegrodach budynku.

Sformułowanie jednoznacznej charakterystyki cieplno-przepływowej budynku, w tym także o otwartej strukturze wewnętrznej, jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Budynek o identycznej, jak analizowana w pracy, formie architektonicznej i strukturze materiałowej przegród, ale badany przy innych niż średnie, wartościach parametrów klimatu, czy w innej lokalizacji, a także przy zmienionej orientacji przegród oraz chropowatości terenu, itd., będzie wykazywał inne charakterystyki cieplno-przepływowe. Badania, które uwzględniają wpływ i zależność wszystkich tych czynników na wartość temperatury i wymianę powietrza w budynkach, uzmysławiają złożoność zagadnienia i hierarchię założeń projektowych. Pierwszym wyborem jest zgodność projektu architektonicznego z rozumianą w szerokim sensie lokalizacją działki. Pod pojęciem lokalizacji działki kryje się także: wietrzność i chropowatość obszaru, stopień nasłonecznienia lub zacielenia terenu. Wszystkie powyżej wymienione czynniki definiowane są przez lokalne wartości parametrów klimatu, które odnoszą się do temperatury otoczenia, promieniowania słonecznego – całkowitego, rozproszonego i odbitego oraz prędkości i kierunku wiatru. W prowadzonych obliczeniach posługiwano się zidentyfikowanymi wartościami parametrów klimatu, które umożliwiają otrzymanie dobowych przebiegów – a nie stałych wartości – obliczanych parametrów budynku [23, 24, 28]. Identyfikację parametrów klimatu można jednak wykonywać na wiele sposobów m.in. konstruując rok testowy [58].

Następnie wymagana jest korekcja systemu wymiany powietrza wentylacyjnego, wynikająca ze struktury materiałowej przegród zewnętrznych oraz orientacji i powierzchni okien, dostępności promieniowania słonecznego oraz trybu

eksploatacji obiektu. Ze zdrowym rozsądkiem klóci się bowiem stosowanie takiego samego systemu wentylacyjnego w budynkach różniących w tak znacznym stopniu potrzebą odprowadzenia nadmiaru ciepła z wnętrza obiektu, jak budynek przed i po termomodernizacji.

Z przedstawionej w pracy analizy wynika potrzeba prowadzenia szerokich prac badawczych, które umożliwią weryfikację normowych wskaźników wymian powietrza wentylacyjnego w kontekście stosowania zróżnicowanej technologii wznoszenia obiektów budowlanych oraz skorelowanie wymiany powietrza z oporem przenikania przegród nieprzezroczystych. Dodatkowo należy uwzględnić regulację dostępu promieniowania słonecznego przez przegrody przezroczyste.

Przedstawione w pracy wyniki badań nie są natury ilościowej, ale jakościowej i wskazują na różnice w warunkach funkcjonowania, panujące w pięciu badanych obiektach. Jednak głównym celem badania były budynki o konstrukcji szkieletowej i z wyodrębnionym materiałem lekkim. Pozostałe obiekty służą celom porównawczym. Warunki kształtowane w budynkach były przy zachowaniu identycznych wymuszeń zewnętrznych i wewnętrznych, tj. równości: mocy wewnętrznych źródeł ciepła, oddziaływań parametrów klimatu, lokalizacji działki. Ponadto wszystkie budynki przedstawiają identyczną formę architektoniczną i zachowują te same gabaryty oraz orientację przegród. Różni je tylko struktura materiałowa zewnętrznych przegród nieprzezroczystych. Stąd też, w różnym stopniu, podlegają one oddziaływaniu promieniowania słonecznego i temperatury otoczenia. W sytuacji zmiany założeń wstępnych, ale identycznych dla wszystkich badanych obiektów, wyniki obliczeń wykazywać będą zawsze te same jakościowe różnice, występujące pomiędzy wybranymi do badań typami budynków.

Przedstawione w pracy wyniki obliczeń obejmują okres letni w Warszawie, a głównie w miesiącu lipcu. Uzyskano je, jak podano powyżej, wykorzystując średnie miesięczne wartości parametrów pogody. Stąd też ich wartości mogą się klócić z powszechnym odczuciem, gdyż najwyższa średnia temperatura osiągnana w lipcu, o godzinie 14<sup>42</sup>, wynosi zaledwie 21,31°C.

Wybór lipca wynika z faktu, że jest on najcieplejszym miesiącem w naszym rejonie geograficznym. Właśnie w okresie letnim, domy – wznoszone z materiałów lekkich lub z ich wyodrębnionym udziałem – stwarzają zazwyczaj problem z odprowadzeniem nadmiaru ciepła z pomieszczeń.

Dodatkową cechą budynków lekkich o konstrukcji szkieletowej, izolowanych wełną mineralną oraz docieplonych jest to, że w niekorzystnych warunkach pogodowych w miesiącach sąsiadujących z sezonem grzewczym, przy niesprzyjających warunkach lokalizacyjnych i małych energetycznych zyskach wewnętrznych, wymagają w dalszym ciągu dogrzewania. Tym samym wydłuża się sezon grzewczy i koszty z tym związane. Budynki izolowane cieplnie skutecznie chronią przegrody obiektu przed absorpcją ciepła z otoczenia zewnętrznego. Dlatego wykonano także symulacje procesów ciepło-przepływowych w maju i wrześniu, w miesiącach bezpośrednio po i przed sezonem grzewczym.

Zdefiniowanie wpływu właściwości termicznych przegród budynku na intensywność naturalnej wymiany powietrza i wysokość temperatury wewnętrznej, a tym samym wyznaczeniu zakresu stosowania wentylacji naturalnej mogą służyć otrzymane przebiegi temperatury zewnętrznej oraz liczby wymian powietrza. Obliczenia te także mogą być wykorzystywane w procesie szacowania energochłonności systemu hybrydowego proponowanego w budynku. Istnieje więc potrzeba tworzenia narzędzi numerycznych, używanych w praktyce inżynierskiej, podobnych do programu autorskiego. Narzędzia takie służą badaniu dynamiki budynku, której charakterystyka zależy od bardzo wielu czynników i pominięcie któregośkolwiek z nich w założeniach do projektu, może stać się źródłem dyskomfortu i zwiększonych kosztów utrzymania obiektu. Korzystanie z informacji łatwych w interpretacji, a uzyskiwanych z tej klasy programów numerycznych, pomaga dodatkowo wykształcić intuicję projektanta.

Stworzony, na potrzeby prezentowanej pracy, autorski program komputerowy, którego algorytm zakłada jednowymiarowy, nieustalony przepływ ciepła przez przegrody oraz naturalny przepływ powietrza, nie dostarcza informacji o polach prędkości przepływu powietrza i temperatury. Temu celowi mogą służyć zaawansowane programy komercyjne. Zaletą programu jest możliwość szybkiej i łatwej zmiany danych wejściowych charakteryzujących budynek i jego otoczenie oraz szybkość uzyskania reakcji na wprowadzone nowych danych. Wielość, tym sposobem symulowanych numerycznie, charakterystyk cieplno-przepływowych w postaci m.in. przebiegów temperatur i wymiany powietrza wentylacyjnego dostarcza szerokiego materiału porównawczego.

Przyjęty w programie model wymiany ciepła i powietrza ujmuje te procesy deterministycznie, a więc nie obejmuje losowych zmian parametrów w odchyleniach standardowych. Nie uwzględnia także korelacji pomiędzy parametrami. W przypadku zmiennych pogodowych w okresie letnim, a takie wykorzystywano w obliczeniach, istotniejszy wpływ na badane procesy cieplno-przepływowe mają ich amplitudy, niż odchylenia standardowe. W okresie zimowym waga czynników ma odwróconą hierarchię. Odchylenie standardowe dla temperatury otoczenia w lipcu wynosi  $3,45^{\circ}\text{C}$ , a dla całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą wynosi  $1558 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ , przy wartości średniej  $4724 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ . Najistotniejszą rolę w badanych tutaj procesach odgrywa temperatura otoczenia, która koreluje z pozostałymi parametrami pogody, a przede wszystkim z całkowitym promieniowaniem słonecznym. Współczynnik korelacji w przypadku temperatury i całkowitego promieniowania słonecznego w lipcu jest duży, w porównaniu z okresem zimowym i wynosi 0,44. W przypadku promieniowania rozproszonego, które jest także obecne nawet przy pełnym zachmurzeniu, trend jest odwrotny i w lipcu wartość współczynnika korelacji jest znikoma – wynosi 0,01. Parametr ten nie wpływa więc na przebieg procesu. Korelacje temperatury z wiatrem są także bardzo małe [23, 31].

Oczywiście badania dynamiki procesów cieplno-przepływowych, zachodzących w budynkach, mogą przyjąć różne formy. Począwszy od tworzenia bardzo rozbudowanych modeli matematycznych, poprzez eksperymenty laboratoryjne – do stosowania mniej lub bardziej zaawansowanych technik



numerycznych. Wybór metody badawczej wynika z celu prowadzonej pracy. W dalszym ciągu, najpopularniejszy jest eksperyment numeryczny, prowadzony z różną szczegółowością. Symulacje numeryczne, dokonywane przy wykorzystaniu kompleksowego i rozbudowanego modelu, wymagają wysoko wykwalifikowanych badaczy nie tylko do umiejętnego wykorzystania narzędzi, ale także do poprawnej interpretacji wyników symulacji. Stąd też, narzędzia te służą naukowcom oraz używane są w zaawansowanych zagadnieniach inżynierskich.

Literatura przedmiotu dostarcza informacji o profesjonalnych programach komputerowych, wykorzystywanych w zagadnieniach przepływowych [12, 13, 38, 39, 44, 110]. Świadomy badacz może posługiwać się tego typu narzędziami, o ile znana jest mu waga nałożonych na model ograniczeń i uproszczeń. Ta wiedza pozwala poprawnie zinterpretować uzyskane wyniki obliczeń. Pożądana jest także ich weryfikacja np. eksperymentalna. W przypadku braku takiej możliwości, sam może tworzyć narzędzia. Należy również pamiętać, że dostępne na rynku profesjonalne programy wymagają od użytkownika odbycia wielogodzinnych kursów, umożliwiających biegle posługiwanie się tego typu narzędziami.

Przedstawiony opis dynamiki ciepłno-przepływowej, którą analizowano w kolejnych budynkach, wskazuje na zmienne w czasie procesy skutkowo-przyczynowe, będące wynikiem jednakowych, dla wszystkich badanych obiektów, oddziaływań otoczenia zewnętrznego. Analiza temperatur w warstwach przegród budowlanych i pojemności cieplnej przegród, przesunięcie ekstremów wartości względem siebie, obecność lub brak oddziaływania parametrów otoczenia budynku – pozwala lepiej zróżnicować dynamikę tak procesów cieplnych jak i przepływowych w budynkach o różnej strukturze materiałowej przegród nieprzezroczystych.

Zmienna w czasie, dostępność pozyskiwania energii promieniowania słonecznego do kolejnych elementów obiektu, prowadzi do naturalnej konwersji termicznej w budynku, wpływa więc na dynamikę procesów ciepłno-przepływowych w jego wnętrzu i obudowie. Otrzymane wyniki wskazują na konieczność modyfikacji koncepcji architektonicznych projektowania budynków i ich otoczenia. Należy też zwrócić szczególną uwagę na budynki, a głównie na zamieszkałe poddasza, ocieplane materiałem izolacyjnym. Brak należytej uwagi w tym względzie doprowadzi do wzrostu zapotrzebowania na energię, zużywaną przez systemy klimatyzacyjne. Wyniki obliczeń, otrzymane z wykorzystywaniem modelu matematycznego, który umożliwia analizowanie zmiennych w czasie oddziaływań otoczenia zewnętrznego, w tym promieniowania słonecznego wskazują, że budynek uznawany za energooszczędny ze względu na obciążenia energetyczne w sezonie grzewczym, przy określonych rozwiązaniach konstrukcyjno-materiałowych nie jest takim w okresie całego roku. Bezskrytyczne, bez względu na uwarunkowania, kopiowanie koncepcji architektonicznych, może doprowadzić do sytuacji, że zapotrzebowanie energii na cele klimatyzacyjne stanie się główną składową bilansu energetycznego budynku.

Warto przypomnieć, że niebawem wymagana będzie, zgodna z normami Unii Europejskiej, metryka energetyczna każdego użytkowanego obiektu budowla-

nego (dyrektywa 2002/91/EC). Zakres tej metryki nie musi się odnosić jedynie do sezonu grzewczego. Przy pełnej charakterystyce energetycznej budynku, certyfikat energochłonności obiektu powinien obejmować cały rok. Dyrektywa podaje, „że obiekt budowlany, a także jego system ogrzewania i wentylacji musi być zaprojektowany i wykonany w taki sposób, żeby ilość energii potrzebna do jego obsługi była jak najniższa, biorąc pod uwagę warunki klimatyczne i lokalne nawyki użytkowników”. Ponadto stwierdza, „że jakość energetyczna budynków powinna być określona na podstawie metodologii, która może być różna w różnych regionach i która uwzględnia, poza izolacją termiczną, tam gdzie to właściwe, zastosowanie materiałów budowlanych o odpowiednich właściwościach izolacyjnych, a także inne czynniki, mogące mieć istotne znaczenie takie jak: instalacje ogrzewania i wentylacji, zastosowanie energii ze źródeł odnawialnych oraz projekt architektoniczny budynku. Kompleksowe podejście do procesu oceny, przeprowadzanej przez wykwalifikowanych i/lub akredytowanych ekspertów, których niezależność będzie zagwarantowana na podstawie obiektywnych kryteriów, przyczyni się do podniesienia poziomu w danej dziedzinie, jako widoczny wysiłek państw członkowskich w zakresie oszczędności energii w budynkach oraz sprawi, że jakość energetyczna budynków będzie jasna dla właścicieli oraz użytkowników rynku budowlanego Wspólnoty”. Natomiast budynki szczelne, o wysokim oporze cieplnym przegród zewnętrznych, wyposażone w klimatyzatory, a nie systemy wentylacji hybrydowej, nie są obiektami energooszczędnymi.

## Dodatek 2.1

Na mocy równania stanu gazu doskonałego można założyć zależność (2.12) pomiędzy gęstością powietrza a temperaturą [2, 3, 19, 53].

$$\frac{\rho_o - \rho_i}{\rho_i} \cong \frac{T_i - T_o}{T_o} \quad (\text{d.2.1.1})$$

Zakłada się mianowicie, że atmosfera traktowana jest jako gaz idealny i relację pomiędzy ciśnieniem i temperaturą opisuje równanie stanu gazu doskonałego

$$p = \rho R T \quad (\text{d.2.1.2})$$

gdzie  $R$  jest stałą gazową dla powietrza równą  $288 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Z powyższego równania można wyprowadzić następującą zależność pomiędzy różnicą gęstości, a różnicą temperatur powietrza:

$$\Delta\rho = \rho_o - \rho_i = \frac{1}{R} \left( \frac{p_o}{T_o} - \frac{p_i}{T_i} \right) = \frac{1}{R} \left( \frac{p_o T_i - p_i T_o}{T_o T_i} \right) = \frac{p_o}{R T_o} \left( \frac{T_i - (p_i/p_o) T_o}{T_i} \right) \quad (\text{d.2.1.3})$$

po przekształceniach otrzymuje się

$$\Delta\rho = \rho_o \frac{T_i - T_o}{T_i} \left( 1 + \frac{T_o}{T_i - T_o} \frac{p_o - p_i}{p_o} \right) = \rho_o \frac{T_i - T_o}{T_i} (1 + K) \quad (\text{d.2.1.4})$$

W praktyce wartość  $K$  nie przekracza  $0,4 \times 10^{-2}$ . Ponadto stosunek ciśnień  $p_i/p_o \approx 1$ . Szacunek ten obarczony jest błędem poniżej 0,02%. Dlatego też można przyjąć, że  $\rho_i T_i \approx \rho_o T_o$ . Przy powyższych założeniach z równania (2.15) otrzymujemy wyrażenie obarczone błędem poniżej 0,5%, [2, 3]

$$\Delta\rho = \frac{p_o}{R T_o} \left( \frac{T_i - T_o}{T_i} \right) = \rho_o \frac{\Delta T}{T_i} = \rho_i \frac{\Delta T}{T_o} \quad (\text{d.2.1.5})$$

## Dodatek 3.1

Horyzontalny ruch powietrza dla płynu nielepkiego w stanie ustalonym, nad terenem otwartym w obszarze poruszania się człowieka, opisuje równanie Naviera-Stokesa [1]:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{d.3.1.1})$$

oraz równanie ciągłości dla płynu nieściśliwego:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{d.3.1.2})$$

a dla składowej losowej równanie Naviera-Stokesa przybiera postać:

$$\frac{\partial(u' w')}{\partial z} = 0 \quad (\text{d.3.1.3})$$

Równanie (d.3.1.3) wykazuje, że pęd strumienia nie zmienia się z wysokością, a po scałkowaniu w granicach od powierzchni gruntu do wysokości z, otrzymuje się następujące wyrażenie

$$-u' w' = \frac{\tau_n}{\rho} \quad (\text{d.3.1.4})$$

gdzie  $\tau_n$  określa naprężenie wywołane tarcie strumienia o powierzchnię gruntu. Obecność turbulencji w przepływie zaznaczona jest w równaniu Naviera-Stokesa przez składową losową wektora prędkości. Losowe zmiany składowej podłużnej  $u'$  zmieniają się liniowo z przesunięciem  $l$  (droga mieszania). Dotyczy to również składowej  $w'$ .

Według Prandtla składowe losowe opisane są poniższymi równaniami

$$u' \cong -\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} l \quad \text{i} \quad w' = -C u' \quad (\text{d.3.1.5})$$

gdzie

$$Cl^2 \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 = u^{*2} \quad (d.3.1.6)$$

$u^*$  jest skalą prędkości, a jej wartość uzyskana jest eksperymentalnie, a  $\sqrt{Cl} = K z$ , gdzie  $K = 0,4$  jest stałą Karmana.

Stąd średnią wartość prędkości wiatru oblicza się z poniższej zależności

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u^*}{Kz} ; \quad \bar{u}(z) = \frac{u^*}{K} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (d.3.1.7)$$

Tuż przy powierzchni gruntu, tj. dla  $z = z_0$ , średnia prędkość wiatru  $\bar{u} = 0$ .  $Z_0$  jest skalą chropowatości, a jej wartość otrzymuje się eksperymentalnie.

## Dodatek 6.1

Tablica d.6.1.1. Sumy dobowe całkowitego promieniowania słonecznego na przegrody budynku [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$  na dobę]

a)

| orientacja przegrody | N     | E     | S     | W     |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| maj                  | 4,786 | 7,990 | 8,613 | 9,395 |
| lipiec               | 5,333 | 7,445 | 7,609 | 9,369 |
| wrzesień             | 2,534 | 4,571 | 7,174 | 5,125 |

b)

| orientacja przegrody | N     | E     | S      | W      |
|----------------------|-------|-------|--------|--------|
| maj                  | 6,468 | 9,692 | 10,295 | 11,077 |
| lipiec               | 7,031 | 9,143 | 9,307  | 11,065 |
| wrzesień             | 3,499 | 5,536 | 8,139  | 6,091  |

W tablicy d.6.1.1 podano sumy dobowe promieniowania całkowitego przy założeniu że przegrody:

- a) nie podlegają zacienieniu, brak jest także promieniowania odbitego od gruntu,
- b) nie podlegają zacienieniu, uwzględnia się promieniowanie odbite od gruntu przy  $\rho_r = 0,2$ .

Należy zwrócić uwagę na współczynnik refleksyjności dyfuzyjnej. Jego wartość zależy od rodzaju podłoża wokół budynku. Sumy promieniowania podane w tablicy obliczono przy wartości współczynnika 0,2, tak jak dla gleby nie porośniętej. Natomiast dom usytuowany nad brzegiem np. jeziora zyskiwałby więcej energii słonecznej z tytułu innej refleksyjności podłoża. Przy spokojnej tafli wody wartość współczynnika wynosi 0,7–0,9. Za to budynek otoczony suchym asfaltem otrzymywałby z tytułu refleksyjności tego podłoża znikome dawki promieniowania bo współczynnik w tym wypadku wynosi tylko 0,07.

## Literatura

1. Allard F., Natural ventilation in buildings: a designed handbook, James & James, 1998,
2. Andersen K. T., Theory for natural ventilation by thermal buoyancy in one zone with uniform temperature, *Building and Environment* 38, 1281-1289, 2003,
3. Andersen K., Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy, *ASHRAE Transaction*, 1995, 101(2), 1103-17,
4. ASHRAE Fundamentals Handbook, Ch. 14, Airflow around buildings, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 1985,
5. ASHRAE Fundamentals Handbook, Ch. 23, Infiltration and ventilation, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 1989,
6. ASHRAE Fundamentals Handbook, Ch. 26, Ventilation and infiltration, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2001,
7. ASHRAE, Ventilation for acceptable indoor air quality, ANSI/ASHRAE Standard 62-1999, 1999,
8. Asynsley R. M., Melburn W., Vickery W., Architectural aerodynamics, Applied Science Publishers, 1977,
9. AUDYTOR OZC 3.0. Program komputerowy do obliczania sezonowego zapotrzebowania ciepła do ogrzewania budynków,
10. Awbi H. B., Ventilation of buildings, Chapman & Hall, 1991,
11. Awbi H. B., Air movement in naturally-ventilated buildings, *Proc. WRECI*, 241-247, 1996,
12. Awbi H. B., Application of computational fluid dynamics in room ventilation, *Building and Environment*, 24, 73-84,
13. Axley J., Introduction to the design of natural ventilation system loop equation, *Proc. 19<sup>th</sup> AIVC Conf. Ventilation Technologies Urban Areas*, 47-56, 1998,
14. Bains W. Turner, J., Turbulent buoyant convection from a source in a confined region, *J. Fluid Mech.*, 51-80, 1969,
15. Bakers P. H., Sharples S., Ward I. C., Air flow through cracks, *Building and Environment*, 22, 293-304, 1987,
16. Batchelor G. K., An introduction to fluid dynamics, Cambridge University Press, 1980,
17. Brohus H., Frier., Heiselberg, Stochastic single multizone models of a hybrid ventilated building-a Monte Carlo simulation approach, Technical Report, Aalborg University, Annex 35, 2002,

18. Brown B. G., Katz R. W., Murphy A. H., Time series models to simulate and forecast wind speed and wind power, *J. Clim. Appl. Meteor.* 23, 1184-1195, 1984,
19. Bruce J. M., Natural convection through openings and its application to cattle building ventilation, *J. of Agricultural Engineering Research*, 23, 151-67, 1978,
20. BS 5925, Code of practice for design of buildings: ventilation principles and designing for natural ventilation, British Standards Institution, London, 1980,
21. Bzowska D., Energy demand profile for natural ventilation. Case study, *Archives of Civil Engineering*, 47, 1, 91-108 1, 2001,
22. Bzowska D., Heating load demand for a room under weather conditions, *Archives of Thermodynamics*, Vol. 21, No. 1-2, 43-52, 2000,
23. Bzowska D., Kossecka E., Analiza probabilistyczna danych pogodowych dla Warszawy, *Prace IPPT* 10/1992,
24. Bzowska D., Kossecka E., Analiza promieniowania słonecznego w Warszawie w aspekcie energetyki słonecznej, *Prace IPPT*, 4/1993,
25. Bzowska D., Mechanika przepływu strumienia powietrza w pomieszczeniu z naturalną wentylacją, *Materiały Konferencyjne, ŁÓDŹ'2001*, 36-43,
26. Bzowska D., Natural ventilation induced by weather parameters in two-zone building, *Archives of Civil Engineering*, LI, 1, 135-151, 2005,
27. Bzowska D., Prediction of natural ventilation rates induced by weather parameters, *Archives of Civil Engineering*, 48, 4, 473-492, 2002,
28. Bzowska D., Stochastic modelling of thermal performance for a heated building, *Archives of Civil Engineering*, XLIII, 4, 1997,
29. Bzowska D., The influence of temperature, solar radiation and wind on thermal behaviour of domestic dwellings, VII Internationales Symposium „Wärmeaustausch und Erneuerbare Energiequellen”, Szczecin-2000, 85-92,
30. Bzowska D., Thermal behaviour of a heated building under random weather condition in Warsaw, *Building and Environment*, 37, 677-689, 2002,
31. Bzowska D., Wind speed characteristics with regard to wind direction, *Archives of Civil Engineering*, 47, 1, 75-89, 1, 2001,
32. Chen Z., Delsante A., Li, Y., Rowe d., Hybrid ventilation in office and educational buildings, *Proc. 1<sup>st</sup> International HybVent Forum*, 1999,
33. Chikamoto T., Kato S., Murakami S., Study on hybrid air-conditioning system using natural ventilation in office space, *ROOMVNT'98*, 181-188,
34. Chwieduk D., Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku, *Prace IPPT*, 2006,
35. Chwieduk D., Pluta Zb., Wnuk R., Wybrane aspekty wykorzystania energii promieniowania słonecznego w projektowaniu, *Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa*, Warszawa 1994,
36. CIBSE Guide, Air infiltration and natural ventilation, *The chartered initiation of building services engineering*, 1999,



37. Calderaro V., Agnoli S., Passive heating and cooling strategies in an approaches of retrofit in Rome, *Energy and Buildings*, 39, 875-885, 2007,
38. Clifford M. J. et al., Using computational fluid dynamics as a design tool for naturally ventilated buildings, *Building and Environment*, 32(4), 305-312, 1997,
39. 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,
40. Condradsen K., Nielson L. B., Prahm L. P., Review of Weibull statistics for estimation of wind speed distribution, *J. Clim. Appl. Meteor.*, 23, 1173-1183, 1984,
41. Cooper P., Hunt G., Linden P.F., The filling box containing a vertically distributed source of buoyancy – private communication,
42. Davenport A.G., The application of statistical concepts to the wind loading of structures, *Proc. Inst. Civ. Eng.* 12, 1961a,
43. Davenport A.G., The dependence of wind loads on meteorological parameters, WEBS, Ottawa, 1967,
44. Descalaki E., Santamouris M., Natural ventilation of buildings - a design handbook, James & James Ltd, London UK, 1998,
45. Design of hybrid ventilation in existing, chosen objects, *Proc. of workshop*, Gliwice, 2004,
46. Duffie J. A., Beckman W. A., *Solar engineering of thermal processes*, J. Wiley & Sons, 1991,
47. Dzieniszewski W., *Procesy cieplno-przepływowe w budynkach, Podstawy modelowania matematycznego*, KILiW, Łódź 2005,
48. EN 13465, Ventilation for buildings – Calculation methods for the determination of air flow rates for dwellings,
49. Epstein M., Buoyancy-driven exchange flow through small openings in horizontal partitions, *J. Heat Transfer*, 11, 980-987, 1989,
50. Ernst D. R., Predicting wind-induced air motion, occupant comfort and cooling loads in naturally ventilated buildings, University of California at Berkeley, 1991,
51. Etheridge D. W., Crack flow equation and scale effect, *Building and Environment*, 12, 181-189, 1977,
52. Etheridge D., Nondimensional methods for natural ventilation design, *Building and Environment*, 37, 1057-1072, 2002,
53. Etheridge D., Sandberg M., *Building ventilation: theory and measurement*, John Wiley & Sons, 1996,
54. Foit H., Lubina P., Określanie sezonowych wentylacyjnych potrzeb ciepłych budynków mieszkalnych, *Materiały Konferencyjne, ŁÓDŹ'99*, 86-93,
55. Foster M.P., Down M.J., Ventilation of livestock buildings by natural convection, *J. Agric. Engling. Res.*, 37, 1-13, 1987,

56. Fracastaro G., Mutani G., Perino M., Experimental and theoretical analysis of natural ventilation by window openings, *Energy and Buildings*, 34, 817-827, 2002,
57. Garcia A., Torres J.L., Prieto E., De Francisco A fitting wind speed distributions: case study, *Solar Energy*, Vol. 62, No. 2, 139-144, 1998,
58. Gawin D., Kossecka E., Typowy rok meteorologiczny do symulacji wymiany ciepła i masy w budynkach, P. Łódzka, 2002,
59. Gladstone Ch., Woods A. W., On buoyancy-driven natural ventilation of a room with a heated floor, *J. Fluid Mech.*, 293-314, 2001,
60. Gladstone Ch., Woods A., The natural ventilation of a room with an areal source of heat and two openings, *Proc. of ROOMVENT 2000*,
61. Heiselberg P., Principles of hybrid ventilation, Annex 35, Aalborg Univ., Denmark, 2002,
62. Hennessy J. P., Jr., Some aspects of wind power statistics, *J. Appl. Meteor.*, 16, No 2, 1977,
63. Hokoi S, Matsumoto M., An analysis of stochastic properties of the heating load in a intermittently air-conditioned building, *Energy and Buildings*, 11, 259 – 263, 1988,
64. Hopkowicz M., Sul A., Analiza wpływu obciążeń termicznych pochodzących od środowiska zewnętrznego na komfort cieplny budynku wielorodzinnego, *Materiały Konferencyjne, Kazimierz Dolny*, 1997,
65. Hunt G. R., Linden P. F., Steady-state flows in an enclosure ventilated by buoyancy forces assisted by winds, *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 426, 355-386, 2001,
66. Hunt G. R., Linden P. F., The fluid mechanics of natural ventilation-displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind, *Building and Environment*, 34, 707-720, 1999,
67. Johnson N. L., Katz S. and Balkrishnan N. Continuous unvaried distributions, 1, 2nd, Wiley Interscience, N. Y. 1994,
68. Kato S. et al, Hybrid air-conditioning based on natural and mechanical ventilation in office building, 8<sup>th</sup> Inter. Confer. on Indoor Air Quality, Edinburgh, 1999,
69. Kisilewicz T., Stateczność cieplna budynków pasywnych, *Materiały Konferencyjne, ŁÓDŹ'2003*,
70. Kisilewicz T., Wpływ właściwości dynamicznych na długookresowe zapotrzebowanie na energię, *Materiały Konferencyjne, ŁÓDŹ'2001*,
71. Klemm K., Warunki wietrzności w wybranych strukturach urbanistycznych i wybór optymalnych rozwiązań, Praca doktorska, Politechnika Łódzka 1998,
72. Kossecka E., Bzowska D., Estimation of Solar Radiation on Inclined Surfaces – The Clearness Indices Method, *Archives of Civil Engineering*, 11, 1, 105-120, 1994,
73. Li Y., Delsante A. el, Some examples of solution multiplicity in natural ventilation, *Building and Environment*, 36, 851-858, 2001,

74. Li Y., Delsante A., Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces, *Building and Environment*, 36, 59-71, 2001,
75. Liddament M., Air infiltration calculation techniques – An application guide, Air Infiltration and ventilation Centre, Coventry, UK, 1986,
76. Limam K., Innard C., Allard F., Etude experimentale des transferts de masse et de chaleur a travers les grandes ouvertures verticales, *Con. Groupe d'Etude de la Ventilation et du Renouvellement d'Air*, INSA, Lyon, 98-111, 1991,
77. Linden P., Lane-Serff G., Smeed D., Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation, *J. Fluid Mech.*, 212, 309-335, 1990,
78. Linden P., The fluid mechanics of natural ventilation, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31, 201- 238, 1999,
79. Lomas K., Cook M., Fiala D., Low energy architecture for severe US climate: Design and evaluation on a hybrid ventilation strategy, *Energy and Buildings*, 39, 32-44, 2007,
80. Lomas K., Architectural design of an advanced naturally ventilated building form, *Energy and Buildings*, 39, 166-181, 2007,
81. Lipska B., Quality control of the numerical prediction of buoyant plumes and their surroundings in displacement ventilation, *Archives of Civil Engineering*, 2006,
82. Lipska B., Trzeciakiewicz Zb., Popiołek Zb., Mierzwiński St., Praktyczne wykorzystanie numerycznego modelowania do prognozowania przepływów wentylacyjnych, *COW*, 11, 2001,
83. Liu B.Y.H., Jordan R.C., The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, *Solar Energy*, Vol. 4, 4-19, 1960,
84. Lorenc H., Struktura i zasoby energetyczne wiatru w Polsce, IMGW, seria *Meteorologia-25*, 1996,
85. Maas J., Nighttime ventilation by stack effect, *ASHRAE Transaction*, 97(1), 516-524,
86. Melaragno M. G., Wind in architectural and environmental design, VNR, 1992,
87. Mierzwiński St., Wentylacja hybrydowa w budownictwie zrównoważonym, *COW*, 2003,
88. Morton B.R., Tylor G.I., Turner J.S., Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, *Proceeding of R. Society*, A 234: 1-23, 1956,
89. Nfaoui H., Buret J., Sayigh A.A.M., Stochastic simulation of hourly average wind speed sequences in Tangiers (Marocco), *Solar Energy*, Vol. 56, No. 3, 301-314, 1996,
90. Nfaoui H., Buret J., Sayigh A.A.M., Wind characteristics and wind energy potential in Marocco, *Solar Energy*, Vol. 63, No. 1, 51-60, 1998,
91. Nowak H., Właściwości radiacyjne powłok stosowanych w zestawach szyb zespolonych, *Materiały Konferencyjne, ŁÓDŹ 2001*,

92. Orme M., Liddament M., Wilson A., An analysis and data summary of the AIVC's numerical database, Technical Note 44, The Air Ventilation and Infiltration Centre, Coventry, U.K., 1994,
93. Pluta Z., Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej, P.W., 2000,
94. Pluta Z., Słoneczne instalacje energetyczne, P.W., 2003,
95. PN-83/B-03430, Wentylacja w budynkach mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej, Wymagania,
96. PN-B-02025, Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego, lipiec 2001,
97. PN—EN 12831, Instalacje grzewcze w budynkach. Obliczenie zapotrzebowania na moc cieplną,
98. Recknagel-Sprenger, Ogrzewanie i klimatyzacja, Poradnik, Arkady, Warszawa 1976,
99. Rosiński M., Spik Z., Analiza kosztów zużycia ciepła na ogrzewanie i wentylację budynków jednorodzinnych w zależności od zastosowanego źródła ciepła i rodzaju paliwa, COW, 23-27, 2005,
100. Sodha M. S., Bansal N. K., Kumar A., Bansal P. K., Malik M. A. S., Solar passive building, Science and Design, Pergamon Press, 1986,
101. Staniszewski B., Wymiana ciepła – podstawy teoretyczne, PWN, Warszawa 1963,
102. Sutton O. G., Micrometeorology, McGraw Hill, 1953,
103. Thomas D. A., Dick J. B., Air infiltration through gaps around windows, JIHVE, 21, 85-97, 1953,
104. Troen N. G., Petersen E. L., European wind atlas, Riso National Lab. 1989,
105. Trzeciakiewicz Z., Energy supply for modern buildings, Summer School, Gliwice, 2004,
106. Voeltzel A., Carrie F.R., Guarracino G., Thermal and ventilation modelling of large highly-glazed spaces, Building and Environment, 121-132, 2001,
107. Walker I., Wilson D., Practical methods for improving estimates of natural ventilation rates, Air Infiltration Review, Vol. 16, 1994,
108. Wiśniewski S., Wymiana ciepła, PWN, Warszawa 1979,
109. Wouters P. et al., Classification of hybrid ventilation concepts, Research Project 2003, Aalborg University,
110. Zhai J., Chen Q., Performance of coupled building energy and CFD simulations, Building and Environment, 37, 333-344, 2005.