

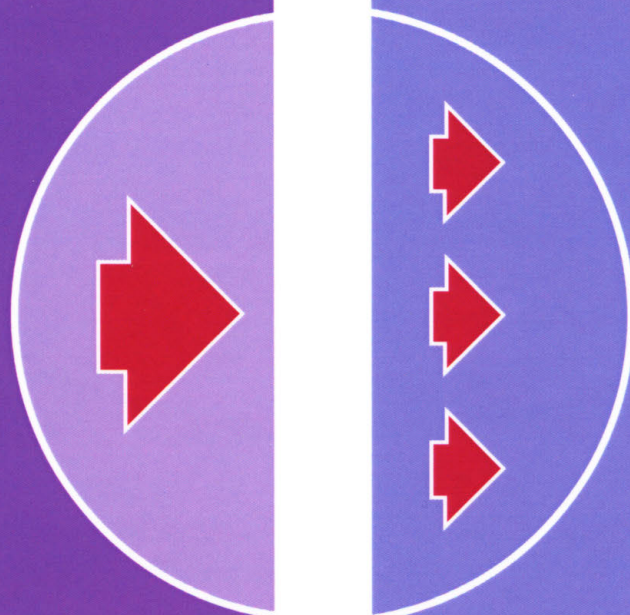
BIBLIOTEKA GŁÓWNA
POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ

P.

M-681 68

FIZYKA BUDOWLI
W TEORII I PRAKTYCE

BUILDING PHYSICS
IN THEORY AND PRACTICE



TOM X, Nr 2

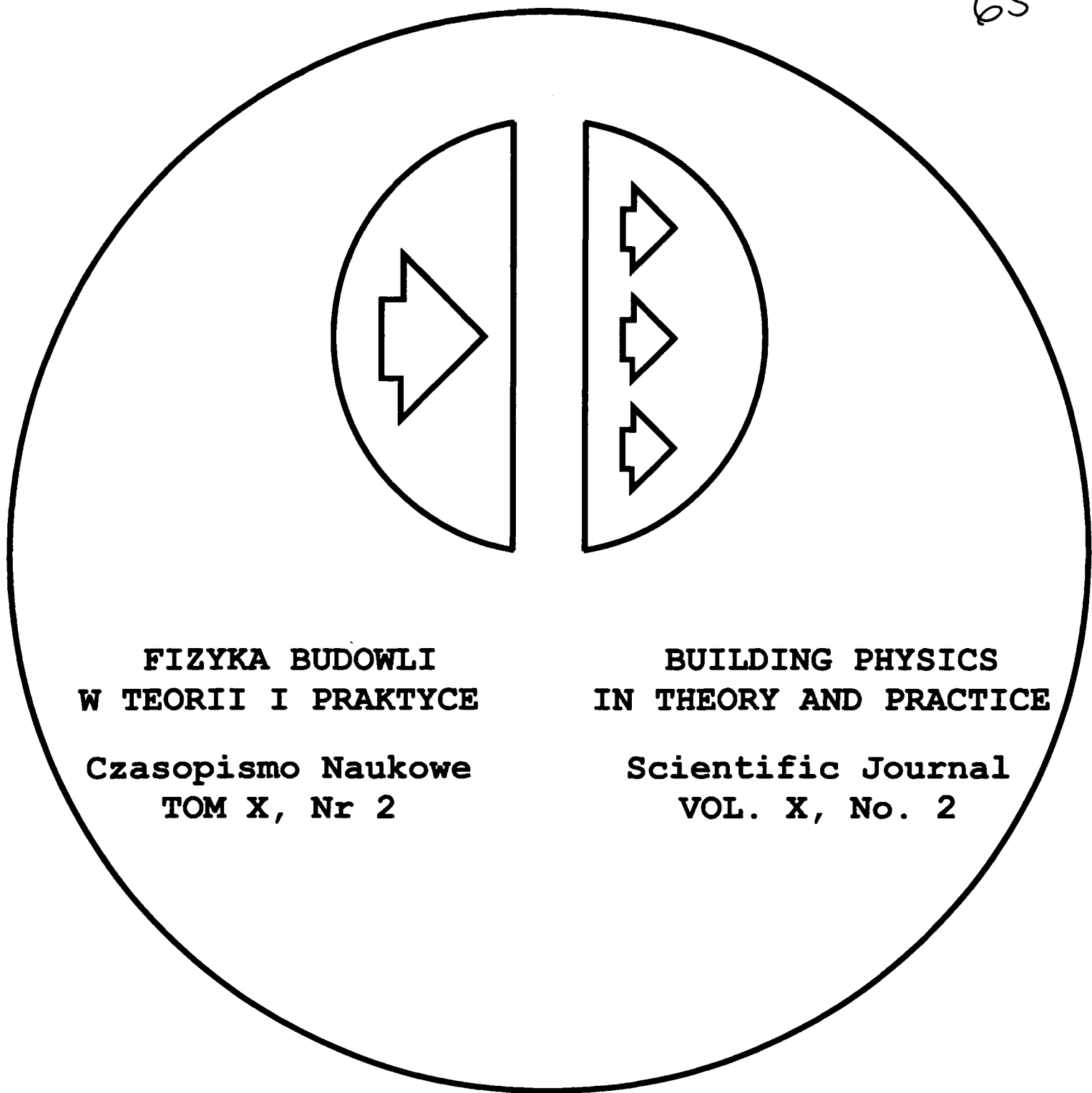
VOLUME X, No. 2

ŁÓDŹ 2018

77737-40001

Biblioteka Główna
Politechniki Łódzkiej

M-481
P 68



INSTYTUT FIZYKI BUDOWLI KATARZYNA I PIOTR KLEMM S.C.

INSTITUTE OF BUILDING PHYSICS KATARZYNA & PIOTR KLEMM S.C.

On 125/18

ŁÓDŹ 2018

RADA NAUKOWA - SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Stanislav Darula (Slovak Republic)
Prof. Halina Garbalińska (Poland)
Prof. Givi Gavardashvili (Georgia)
Prof. Dariusz Gawin (Poland)
Prof. Peter Häupl (Germany)
Prof. Jan Hensen (Netherlands)
Prof. Aleksander Jewtuszenko (Ukraine)
Prof. Karel Kabele (Czech Republic)
Prof. Agnieszka J. Klemm (Great Britain)
Prof. Halina Koczyk (Poland)
Prof. Jan Kubik (Poland)
Prof. Thomas Lützkendorf (Germany)
Prof. Henryk Nowak (Poland)
Prof. Jerzy Zb. Piotrowski (Poland)
Prof. Myroslav Sanytsky (Ukraine)
Prof. Henk L. Schellen (Netherlands)
Prof. Igor Shubin (Russia)
Doc. Iveta Skotnicová (Czech Republic)
Prof. Jan Ślusarek (Poland)
Prof. Jiří Vaverka (Czech Republic)
Doc. Marián Vertaľ (Slovak Republic)
Prof. Zuzana Vranayová (Slovak Republic)
Prof. Monika Woloszyn (France)
Prof. Jerzy Wyrwał (Poland)
Prof. Vasyl Zhelykh (Ukraine)

ZESPÓŁ REDAKCYJNY - EDITORIAL BOARD

Redaktor Naczelny - Editor-in-chief

Prof. Piotr Klemm

Komitet Redakcyjny - Editorial Committee

Dr hab. Dariusz Heim
Dr hab. Katarzyna Klemm
Dr Maciej Wojtczak

WYDAWCA - PUBLISHER

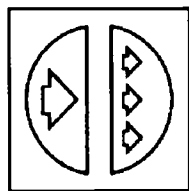
Instytut Fizyki Budowli Katarzyna i Piotr Klemm S.C.
Institute of Building Physics Katarzyna & Piotr Klemm S.C.
ul. Świetlana 7, 91-490 Łódź, **e-mail: poczta@fizykabudowli.com.pl**

ISSN 1734-4891

SPIS TREŚCI

TABLE OF CONTENTS

ICKIEWICZ I., Kompleksowa termomodernizacja budynków wielorodzinnych, a redukcja zanieczyszczenia powietrza na przykładzie miasta w północno-wschodniej Polsce.....	5
JASIŃSKI T., Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w modelowaniu prędkości wiatru jako jednej z determinant poboru energii w budynkach.....	9
KUBIK J., BUŁKA A., Wysychanie zasolonej ceramiki zabytkowej	15
LICHOŁAI L., STARAKIEWICZ A., KRASOŃ J., MIĄSIK P., Wpływ konfiguracyjnych rozwiązań warstwy przeszklenia na energetyczne funkcjonowanie zmodyfikowanej przegrody kolektorowo – akumulacyjnej	19
PIECHNA J., TUDRUJ S., KAMIENIECKI K., JÓŻWIAK R., Analiza numeryczna interakcji opływu pomiędzy grupami budynków o różnych wysokościach	25
SZYMKOWIAK M., HEIM D., SOWA J., Emisja lotnych związków organicznych z urządzeń biurowych – aktualny stan wiedzy oraz plan badań.....	31



KOMPLEKSOWA TERMOMODERNIZACJA BUDYNKÓW WIELORODZINNYCH, A REDUKCJA ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA NA PRZYKŁADZIE MIASTA W PÓŁNOCNO-WSCHODNIEJ POLSCE

Irena ICKIEWICZ*

*Politechnika Białostocka,
email: i.ickiewicz@pb.edu.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę wpływu termomodernizacji budynków mieszkalnych wielorodzinnych, wykonanej około 15 lat temu, na aktualne zanieczyszczenie powietrza. Analizę wykonano na podstawie sporządzonych kilkudziesięciu opinii technicznych dot. efektywności energetycznej. Uzyskane efekty redukcji zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków, są o około 30% niższe w stosunku do zakładanych w audytach energetycznych, które zostały wykonane na potrzeby projektowanych dociepleń.

Słowa kluczowe: termomodernizacja, efektywność energetyczna, zanieczyszczenie powietrza.

1. WPROWADZENIE

Relatywnie wysokie i ciągle rosnące ceny energii i nośników (wzrost cen wyprzedza tempo inflacji) spowodowało zainteresowanie inwestycjami termomodernizacyjnymi dającymi w efekcie zmniejszenie zapotrzebowania na energię oraz obniżenie kosztów jej wytwarzania. Nie bez znaczenia jest również fakt ciągłego zaostrzania wymagań cieplnych w stosunku do budynków nowych jak i poddawanych termomodernizacji oraz zaostrzenie wymagań w stosunku do dopuszczalnego poziomu emisji dwutlenku siarki, pyłu ogólnego, jak i CO, NO₂ (zaliczających się do tak zwanych zanieczyszczeń podstawowych powstających głównie podczas spalania paliw w procesie wytwarzania energii).

Źródłem emisji zanieczyszczeń podstawowych są przede wszystkim emitery elektrowni zawodowych i przemysłowych tzw. emisja wysoka, ale także sektor komunalno-bytowy: lokalne kotłownie, zakłady usługowe oraz gospodarstwa indywidualne tzw. emisja niska [5].

Źródła ciepła w sektorze komunalno-bytowym charakteryzują trzy czynniki: pokrycie bieżącego i perspektywicznego

zapotrzebowania na energię, minimalizowanie cen energii oraz ostatni, jako szczególnie ważny — redukcję negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

Redukowanie negatywnego wpływu na środowisko naturalne jest jednym z priorytetów Unii Europejskiej [7].

W ciągu ostatnich 2 lat autorka artykułu brała udział w wykonaniu kilkudziesięciu opracowań dotyczących oceny efektywności energetycznej wykonanej termomodernizacji. Te kompleksowe opracowania zawierały ocenę wykonanych prac dociepleniowych przegród oraz elementów istniejącego systemu ciepłowniczego to jest; źródła ciepła, sieci i węzłów cieplnych oraz ich instalacji wewnętrznych [1].

Na podstawie opracowanych opinii dokonano również analizy ekologicznej tych przedsięwzięć.

Analiza ekologiczna dotyczyła oceny redukcji zanieczyszczeń podstawowych powietrza uzyskanych w wyniku obniżenia mocy cieplnej na skutek przeprowadzonej kompleksowej termomodernizacji.

2. CHARAKTERYSTYKA ELEMENTÓW ISTNIEJĄCEJ GOSPODARKI CIEPLNEJ W ANALIZOWANYM MIEŚCIE

2.1. Budynki

W analizowanym mieście przedmiotowe budynki mieszkalne wielorodzinne wykonane zostały głównie w technologii uprzemysłowionej OWT 67, OWT 67 N, Cegły Żerańskiej i kilka budynków w technologii tradycyjnej.

Jako miernik energochłonności budynków przyjęto tzw. wskaźnik kubaturowy. Wskaźnik ten zależnie od technologii wykonania wahał się od 15 W/m³ (budynki w miarę dobre pod kątem izolacyjności termicznej) do 40 W/m³ (budynki

*Autor korespondencyjny, email: i.ickiewicz@pb.edu.pl

bardzo energochłonne). Najmniej energochłonnym okazał się system OTW najbardziej energochłonnym system Cegły Żerańskiej. Średnie wskaźniki kubaturowego zapotrzebowania na ciepło na cele centralnego ogrzewania dla budownictwa mieszkalnego, w rozbiu na poszczególne technologie wykonania budynków zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Wskaźniki kubaturowe energochłonności budynków przed i po termomodernizacji

Table 1. Capacity ratios of energy consumption of buildings before and after thermomodernization

Lp	Technologia wykonania budynku	Średni wskaźnik kubaturowy [W/m ³]		
		Przed termomodernizacją	Po termomodernizacji	Redukcja* [%]
1.	OWT	29,15	12,9÷15,30	51,63
2.	OWT 67N	30,8	18,3÷18,83	39,72
3.	C. Żerańska	35,6	18,80÷22,4	42,13
4.	Tradycyjna	33,7	12,1÷19,55	53,04

*redukcja w odniesieniu do wartości średniej

Drugim wskaźnikiem, jaki przyjęto do oceny energochłonności budynków był wskaźnik zapotrzebowania na energię końcową EK, który wynosił w zależności od daty wzniesienia poszczególnych budynków, jak i technologii ich wykonania od 240 do 480 kWh/m² na sezon grzewczy. Średnie wartości wskaźnika zapotrzebowania na energię końcową (EK) na cele centralnego ogrzewania dla budownictwa mieszkalnego w rozbiu na poszczególne technologie zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wartości energii końcowej EK dla poszczególnych systemów przed i po termomodernizacji

Table 2. Values of the final energy (EK) for individual systems before and after thermomodernization

Lp.	Technologia wykonania	EK -przed term. [kWh/m ² · a]	EK -po term. [kWh/m ² · a]
1	OWT 67	240÷300	130÷170
2	OWT67N	240÷260	130÷160
3	Cegła Żerańska	260÷300	130÷170
5	Tradycyjny	200÷490	120÷240

We wszystkich analizowanych budynkach została wykonana kompleksowa termomodernizacja polegająca na; dociepleniu ścian zewnętrznych podłużnych i poprzecznych (jeżeli ściany poprzeczne były już ocieplone wełną mineralną gr 5 cm + blacha- rezygnowano z dodatkowego docieplenia) styropianem zwykłym o grubości od 10 cm do 13 cm, dociepleniu ścian piwnicznych styropianem ekstrudowanym o grubości od 10 cm do 14 cm na głębokość 100 cm, dociepleniu stropodachu wełną mineralną lub ekofobrem o

grubości 15 cm granulowanej wełny mineralnej lub ekofibru (docieplenie było wykonywane metodą pneumatyczną), wymianie okien w piwnicy i na klatkach schodowych. Nowe okna charakteryzują się współczynnikiem przenikania ciepła $U < 1,35 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Spółdzielnia zrezygnowała z docieplenia wspornikowych płyt balkonowych (OWT 67), jak również docieplenia logii w OWT 67N, Cegle Żerańskiej i w budynkach wykonanych metodą tradycyjną.

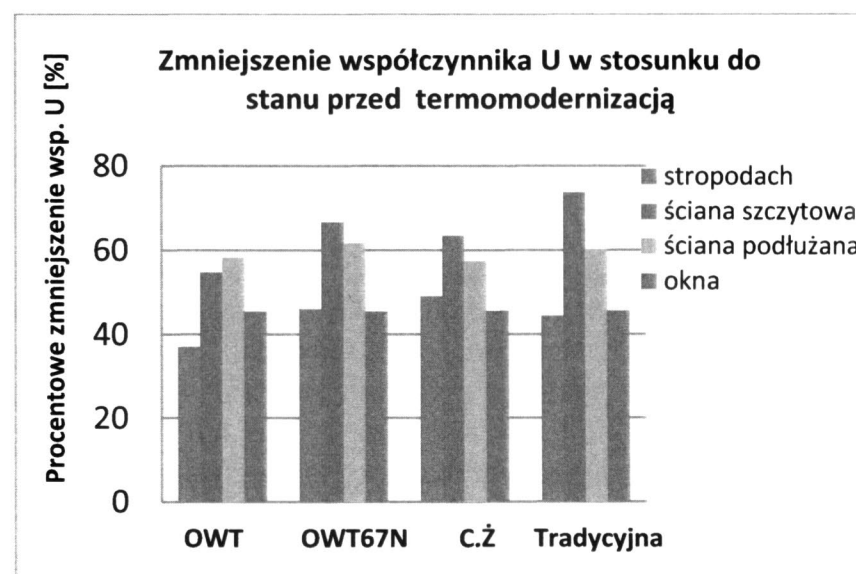
Średnie wartości współczynników przenikania ciepła U [W/(m²·K)] przegród przed i po termomodernizacji zestawiono w tabeli 3. Natomiast procentową redukcję współczynników przenikania ciepła U przedstawiono na rysunku nr 1.

Tabela 3. Zestawienie wartości współczynnika przenikania ciepła U dla poszczególnych systemów

Table 3. U-values (heat transfer coefficient) for individual systems

Lp	Technologia wykonania	U - przed termomodernizacją [W/(m ² · K)]			U - po termomodernizacji [W/(m ² · K)]		
		1	2	3	1	2	3
1	OWT 67	0,701	0,84	1,095	0,44	0,38	0,45
2	OWT67N	0,950	0,84	0,980	0,51	0,28	0,37
3	Cegła Żerańska	0,950	0,89	0,880	0,48	0,32	0,37
4	Tradycyjna	0,99	1,13	1,12	0,55	0,30	0,44
1-stropodach, 2- ściana szczytowa, 3-ściana podłużna							

Dopuszczalne (wg Warunków Technicznych) wartości współczynników przenikania ciepła U w okresie kiedy były wykonywane prace termomodernizacyjne (lata 2007-2009) wynosiły dla ścian zewnętrznych 0,3 W/(m² · K) dla stropodachu 0,25 W/(m² · K).



Rys.1. Wartości współczynników przenikania ciepła przed i po termomodernizacji.

Fig. 1. U-values (heat transfer coefficient) before and after thermomodernization

Budynki wybudowane w latach 90-tych (zgodnie z obowiązującymi wówczas wymaganiami zamieszczonymi w normie PN-B/91-02020 „Ochrona cieplna budynków” powinny były charakteryzować się wskaźnikiem ~ 140 EK [kWh/m²·a] oraz współczynnikiem przenikania ciepła U ściany ≤ 0,45 [W/(m²·K)]. Jak wynika z tabel 1 i 2 oraz rys.1. wartości te przed termomodernizacją w większości przypadków były ponad 2 dwukrotnie przekroczone.

2.2. Systemy ciepłownicze

Wszystkie budynki wielorodzinne zasilane są w ciepło z ciepłowni miejskiej o sumarycznej mocy cieplnej 35 MW, za pośrednictwem grupowego węzła cieplnego zlokalizowanego na osiedlu oraz rozdzielaczy ciepła znajdujących się w piwnicach budynków. Jako paliwo wykorzystuje się węgiel, miał węglowy oraz odpady drzewne.

Dla analizowanego źródła ciepła roczna emisja zanieczyszczenia dwutlenkiem siarki (SO₂) wynosiła 612 ton/rok i pyłami (PM10) 508 ton/ rok. (przed termomodernizacją)

Aby zmniejszyć źródło zanieczyszczeń powietrza poza dociepleniem przegród również przeprowadzono modernizację systemów ciepłowniczych polegającą na wymianie grupowych węzłów cieplnych na nowe z zastosowaniem pełnej automatyki, montażu zaworów odcinających i regulujących, montażu zaworów podpiornowych, wprowadzeniu podzielników kosztów ogrzewania. W wyniku modernizacji (w tym podniesienia sprawności instalacji grzewczych) podobnie jak przy dociepleniu przegród uzyskano redukcję zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków. Wartości obliczeniowe redukcji zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania zamieszczono w tabeli 4.

2.3. Emisja zanieczyszczeń - metoda obliczeniowa

Do oszacowania ilości emisji szkodliwych substancji pyłowo-gazowych posłużono się metodą obliczeniową zamieszczoną poniżej [4]

Emisję substancji szkodliwych zawartych w spalinach obliczono wg zależności:

$$E = B \cdot W_s \cdot \% \text{ [kg/h]} \quad (1)$$

gdzie:

B – maksymalne zużycie paliwa [kg/h],

W_s – wskaźnik emisji,

% – procentowa zawartość składnika w paliwie.

Wartość emisji pyłu obliczono w sposób następujący :

- dokonano podziału na frakcje ze szczególnym uwzględnieniem pyłu zawieszonego < 10 μm,
- uwzględniono w obliczeniach sprawność odpylenia czopucha, uwzględniono obecność urządzeń odpylających i skuteczność ich działania.

Emisje zanieczyszczeń pyłowych obliczono według zależności :

$$E_p = \frac{B \cdot U_p \cdot A_r \cdot (100 - \eta) \cdot e_{fn}}{100 - k} \quad (2)$$

gdzie:

E_p – emisje zanieczyszczeń pyłowych

U_p – wskaźnik unosu pyłu

A_r – zawartość popiołu w pyle, %,

k – zawartość części palnych w pyle,

η – sprawność odpylania czopucha lub cyklonu,

e_{fn} – udział frakcji w pyle podczas spalania paliwa.

W obliczeniach przyjęto :

Dla pyłu zawieszonego PM10 przy spalaniu węgla 0,14 %, a drewna 0,44%, dla pyłu > 10 μm przy spalaniu węgla 0,86 %, a drewna 0,56 %.

Natomiast wartość emisji jednostkowych dwutlenku siarki z poszczególnych kotłowni obliczono z zależności :

$$E_{so2} = \frac{1,6 \cdot S_t^r \cdot (100 - \eta)}{Q_w^r} \quad (3)$$

gdzie:

E_{so2} – wartość emisji jednostkowych dwutlenku siarki

S_t^r – zawartość siarki w węglu,

Q_w^r – wartość opałowa węgla,

η – sprawność instalacji odsiarczającej.

Obliczenie zasięgu rozpraszania się (dyspersji) zanieczyszczeń można dokonać według uproszczonego modelu Pasguill'a (model dyspersji zanieczyszczeń jest opisany równaniem różniczkowym dyfuzji w postaci funkcji analitycznej opartej o rozkład Gaussa) [4].

W tabeli 4 zestawiono wartości redukcji zapotrzebowania na energię na cele grzewcze w wyniku przeprowadzonej modernizacji (docieplenie ścian + modernizacja węzłów cieplnych).

W analizowanym mieście zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynków przed termomodernizacją wynosiło 35 MW.

Tabela 4. Redukcja zapotrzebowania na ciepło w wyniku zastosowanych termomodernizacji budynków
Table 4. Reduction of heat demand as a result of the thermomodernization of buildings

Redukcja zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania budynków ΔE _{co}					Redukcja razem	
Zapotrzebowanie przed 2008 r	Termomodernizacja		Modernizacja węzłów cieplnych			
	MW	[%]	MW	[%]	MW	[%]
35 MW	5,60	16,0	3,53	10,1	9,13	26,10

W tabeli 5 zestawiono prognozowaną (na podstawie redukcji zapotrzebowania na ciepło) redukcję emisji zanieczyszczenia pyłowo-gazowego emisji SO₂ i pyłów.

Tabela 5. Redukcja zanieczyszczenia powietrza w wyniku zastosowanych termomodernizacji budynków
Table 5. Reduction of air pollution as a result of the thermomodernization of buildings

Zanieczyszczenie powietrza przed 2007 [ton/rok]		Prognozowana emisja zanieczyszczeń w wyniku zastosowanej modernizacji			
SO ₂	pył	SO ₂		Pył	
		t/rok	%	t/rok	%
616	508	495	19,6	279	45,1

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych kilkudziesięciu opinii technicznych, przy wykonywaniu których użyto kamery termowizyjnej oraz miernika pomiaru gęstości strumienia ciepłego stwierdzono, że uzyskane wartości współczynników przenikania ciepła U mierzone w ocieplonych przegrodach, są niższe o około 30 % od wartości granicznych jakie w tym czasie obowiązywały. Stan taki spowodował, że automatycznie uzyskano niższą efektywność energetyczną niż zakładano w audytach energetycznych.

Bezpośrednią przyczyną takiego stanu mogą być mostki termiczne spowodowane;

- niestarannym osadzeniem okien w mieszkaniach, w których wymiana okien była finansowana przez właścicieli poszczególnych mieszkań,
- nierównomiernym rozłożeniem izolacji cieplnej na stropodachach,
- zawilgoceniem izolacji spowodowanym nieszczelnościami dachu (np. przy rurach spustowych – w większości są to dachy pogrążone)

Poważnym problemem są również mostki termiczne tworzące się przy balkonach wspornikowych czy logiach wynikające z rezygnacji spółdzielni z docieplenia tych miejsc.

Wysokie wartości współczynników przenikania ciepła przekładają się bezpośrednio na większe zapotrzebowanie na ciepło, a co za tym idzie i większą ilość spalonego paliwa do ogrzewania budynków. Zgodnie z cytowanym wzorem (1) powoduje to większą emisję zanieczyszczeń do powietrza. Można założyć z dużym prawdopodobieństwem, że ilości spalonego paliwa jest wprost proporcjonalna do ilości emitowanych szkodliwych substancji (przy założeniu, że wszystkie pozostałe składniki są identyczne).

COMPREHENSIVE THERMOMODERNIZATION OF MULTI-FAMILY RESIDENTIAL BUILDINGS VERSUS REDUCTION OF AIR POLLUTION ON THE EXAMPLE OF ONE CITY IN NORTH-EASTERN POLAND

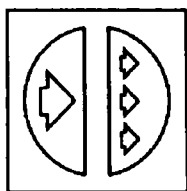
Summary: The paper presents an analysis of the effect of thermomodernization of multi-family residential buildings constructed about 15 years ago on current air pollution. The analysis was made on the basis of several draft technical opinions on energy efficiency. The achieved effects of reducing the heat demand for building heating are about 30% lower compared to the values assumed in the energy audits that have been prepared for the purpose of the designed thermal insulation.

Keywords: thermomodernization, energy efficiency, air pollution

Literatura

- [1] Ickiewicz I., Sarosiek W i inni: *Weryfikacja przeprowadzonej termomodernizacji budynków wielorodzinnych*, Opinie techniczne, PB, 2016-2017
- [2] Ickiewicz I., Stempniak A., Nytko K.: *Koncepcja modernizacji energooszczędnej instalacji ciepłowniczej*, Białystok 1998-2010 (FPE)
- [3] Ickiewicz I., Stempniak A., Nytko K.: *Założenia projektowe dla planu zapotrzebowania na ciepło dla miasta Hajnówka, Siemiatycze, Kolno*; Białystok 1998-2010 (NAPE).
- [4] Nytko K.: *Ocena oddziaływania na środowisko BUT* (PB), Białystok 2008
- [5] Robakiewicz M.: *Studium wykonalności budowy termoregeneracji budynków*, (Gospodarka Paliwami i Energią) 4/94
- [6] Wiater I., Marczak H., Sawa J.: *Ekoinżynieria*. Lublin 2003, Wydawnictwa Naukowe.
- [7] Decyzja Komisji 2007/589/WE z dnia 18 lipca 2007 ustanawiająca wytyczne dotyczące monitorowania i sprawozdawczości w zakresie emisji gazów cieplarnianych zgodnie z dyrektywą 2003/87/WE Parlamentu Europejskiego i Rady (Tekst mający znaczenie dla EOG)” (Dz. U. UE L 229 z 31.8.2007, str. 1).

Finansowanie z pracy statutowej S/WBiI/3/2016



ZASTOSOWANIE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH W MODELOWANIU PRĘDKOŚCI WIATRU JAKO JEDNEJ Z DETERMINANT POBORU ENERGII W BUDYNKACH

Tomasz JASIŃSKI*

Politechnika Łódzka, Wydział Organizacji i Zarządzania, Instytut Nauk Społecznych i Zarządzania Technologiami, email: tomasz.jasinski@p.lodz.pl

Streszczenie: Celem pracy była analiza możliwości wykorzystania narzędzia z obszaru sztucznej inteligencji, jakim są sztuczne sieci neuronowe (ANN) w zagadnieniach związanych z prognozowaniem poboru energii elektrycznej w budynkach. W wielu opracowaniach wykazano, że głównym źródłem popytu na energię są systemy klimatyzacji oraz systemy grzewcze (HVAC). Z tego też powodu jednym z podstawowych determinant zapotrzebowania na energię są czynniki atmosferyczne, w tym prędkość wiatru. W pracy oprócz badań literaturowych przeprowadzono również badania empiryczne w obszarze przewidywania prędkości wiatru przy użyciu ANN wykorzystujących dane archiwalne pochodzące ze stacji meteorologicznej usytuowanej na lotnisku Lublinek w Łodzi. Testom zostały poddane sieci pracujące w oparciu o architekturę perceptronu wielowarstwowego (MLP), sieci realizujące regresję uogólnioną (GRNN) oraz sieci o radialnych funkcjach bazowych (RBF). Modelowanie objęło prędkości wiatru w latach 2008-2016. Dane zostały podzielone na trzy zbiory: uczący, walidacyjny i testowy. Takie podejście umożliwiło minimalizację ryzyka przeuczenia ANN. Jednocześnie użycie jedynie najnowszych informacji w charakterze danych testowych umożliwiło opracowanie modelu, który może zostać wykorzystany w praktyce biznesowej. W pracy nie ograniczono się do poszukiwania optymalnego zbioru zmiennych objaśniających jedynie wśród danych pozyskanych bezpośrednio ze stacji meteorologicznej, lecz analizie poddano także zmienne wejściowe powstałe poprzez zastosowanie narzędzi analizy technicznej.

Słowa kluczowe: sztuczne sieci neuronowe, energia elektryczna, prognozowanie, wiatr

1. WPROWADZENIE

Rozwój przemysłu, który miał miejsce w ciągu ostatniej dekady, przyniósł gwałtowny wzrost zapotrzebowania na energię, w tym na energię elektryczną. Pociągnęło to za sobą procesy mające na celu zarówno ograniczanie jej

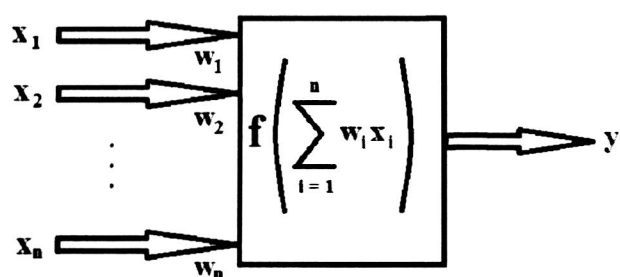
zużycia, jak i poszukiwanie alternatywnych, szczególnie odnawialnych, jej źródeł. Co prawda w wielu krajach obserwuje się obecnie spadek zapotrzebowania na energię związany z postępującym procesem deindustrializacji wywołanym przenoszeniem produkcji do krajów o niższych cenach czynników wytwórczych, w tym przede wszystkim kosztach pracy, to jednak zmiany w jakości życia mieszkańców bogatszej części świata w znacznym stopniu podnoszą – szczególnie okresowo – zapotrzebowanie na energię elektryczną. Jest to związane przede wszystkim ze wzrostem w ostatnich latach popularności wszelkiego rodzaju urządzeń związanych z techniką chłodniczą, przede wszystkim klimatyzatorów. Brak w wielu elektrowniach chłodzenia kominowego, a zatem używanie wodnego chłodzenia powoduje w okresie letnim konieczność ograniczenia ilości generowanej przez nie energii. Jest to również widoczne na terenie Polski, gdzie przykładowo 10 sierpnia 2015 roku konieczne okazało się wprowadzenie 20 stopnia zasilania, a tym samym ograniczeń w poborze mocy przez firmy. Wydarzenia te zintensyfikowały dyskusje na temat stanu oraz perspektyw zmian krajowego systemu generowania oraz dystrybucji energii, szczególności w kontekście inwestycji. Te z kolei są ściśle związane z modelem funkcjonowania rynku energii (więcej w [1]). Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie możliwości modelowania poboru energii w budynkach za pomocą sztucznych sieci neuronowych (ANN – ang. Artificial Neural Networks) z uwzględnieniem modelowania takich czynników atmosferycznych jak np. prędkość wiatru. Praca przedstawia różne aspekty wykorzystania ANN wraz z metodami optymalizacji ich funkcjonowania opartymi o pozostałe narzędzia z obszaru sztucznej inteligencji (AI – ang. Artificial Intelligence), takie jak symulatory algorytmów genetycznych (GA –

*Autor korespondencyjny, e-mail: tomasz.jasinski@p.lodz.pl

ang. Genetic Algorithms), czy strategii ewolucyjnych (ES – ang. Evolutionary Strategies).

2. RAMY KOCEPTUALNE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH

ANN stanowią próbę stworzenia sztucznych komórek nerwowych funkcjonujących w sposób analogiczny do modelu biologicznego. Definicję pojedynczej komórki nerwowej prezentuje rys. 1. Sygnały wejściowe są mnożone przez odpowiadające im wagi, a następnie tak powstałe iloczyny biorą udział w operacji sumowania. Powstałe tzw. całkowite pobudzenie neuronu jest na kolejnym etapie przekształcane za pomocą tzw. funkcji aktywacji, a następnie opuszcza komórkę nerwową stanowiąc albo odpowiedź sieci, albo sygnał wejściowy kolejnych neuronów. Wspomniane wagi są liczbami rzeczywistymi. Właśnie za ich pomocą komórka nerwowa może zyskiwać „inteligencję”. Wagi w procesie nauki sieci ulegają licznym modyfikacjom, dzięki którym odpowiedź sieci jest obciążona coraz to mniejszym błędem. Budowa pojedynczego neuronu jest powszechnie omawiana w literaturze przedmiotu, m.in. w [2] i nie będzie ona przedmiotem dalszych rozważań w niniejszym opracowaniu.



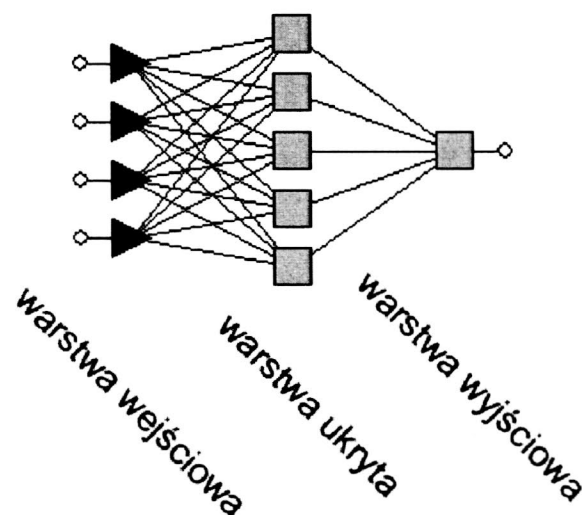
Rys. 1. Schemat budowy sztucznego neuronu [3]
Fig. 1. A scheme of an artificial neuron [3]

Komórki nerwowe mogą zostać ze sobą połączone na wiele różnych sposobów. W zależności od rodzaju tych połączeń wprowadza się podział ANN na liczne podgrupy. W opracowaniu został położony nacisk na jedne z najbardziej popularnych rodzajów ANN – tak zwane sieci jednokierunkowe wielowarstwowe, zwane również perceptronami wielowarstwowymi (MLP – ang. MultiLayer Perceptron). Budowa pozostałych rodzajów ANN jest powszechnie dostępna w literaturze przedmiotu (między innymi w [2]).

2.1. Sieć jednokierunkowa wielowarstwowa

Sieć jednokierunkowa wielowarstwowa jest zbudowana z neuronów pogrupowanych w tzw. warstwy. Jak sama nazwa wskazuje sygnały przepływają przez sieć w jednym kierunku – od wejścia do wyjścia. Pierwsza z warstw – wejściowa – służy do pobrania danych i rozprowadzenia ich wśród dalszych struktur ANN. Neurony tej warstwy nie biorą czynnego udziału w procesie uczenia. Ich wagi nie ulegają w trakcie treningu modyfikacjom. Następnie sygnały

są kierowane do komórek nerwowych zgrupowanych w pierwszej warstwie ukrytej. Neurony tej warstwy potrafią zdobywać wiedzę poprzez zachodzące w nich zmiany wartości wag sprzężonych z wejściami tych komórek. MLP mogą być wyposażone w więcej niż jedną warstwę ukrytą. W praktyce ich ilość najczęściej nie przekracza dwóch, a w wyjątkowych sytuacjach trzech. Za warstwami ukrytymi znajduje się ostatnia, pojedyncza warstwa wyjściowa. Jej neurony także biorą aktywny udział w procesie zdobywania wiedzy.



Rys. 2. Przykład sieci jednokierunkowej wielowarstwowej
Fig. 2. An example of multilayer perceptron

Rys. 2 prezentuje przykładowy MLP o czterech neuronach w warstwie wejściowej, pięciu w pojedynczej warstwie ukrytej oraz pojedynczym neuronie w warstwie wyjściowej. Sygnały wejściowe sieci stanowią zmienne objaśniające. Dane pojawiające się na wyjściach ANN to zmienne objaśniane.

3. MODELOWANIE POBORU ENERGII W BUDYNKACH

Możliwości praktycznego użycia ANN w celu modelowania zagadnień związanych z poborem energii w budynkach są, jak wskazuje literatura przedmiotu, niezwykle szerokie.

3.1. Prognozowanie zapotrzebowania na energię

Zapotrzebowanie na energię w budynkach powiązane jest z wieloma czynnikami. Jednym z głównym jest pobór prądu przez systemy klimatyzacji oraz systemy grzewcze (HVAC – ang. Heating, Ventilation and Air Conditioning). Nie należy jednak zapominać o poborze energii w pozostałych celach, np. oświetleniowych. Wśród czynników mających istotny wpływ na pobór energii wskazuje się w literaturze przedmiotu czynniki pogodowe (przede wszystkim temperaturę, wiatr oraz wilgotność powietrza), konstrukcję budynku (więcej na ten temat można odnaleźć w [4]) oraz jego kształt, liczbę mieszkańców i ich zwyczaje, stopień wykorzystania urządzeń klasy RTV-AGD, a także ich klasę

energetyczną.[5][6][7] W literaturze przedmiotu można odnaleźć badania, w których prognozy są dokonywane w rozbiciu na poszczególne rodzaje popytu. Więcej na temat popytu na energię ciepłą znajduje się między innymi w [8]. R. Mena et al. dokonali prognozy zapotrzebowania na energię dla budynku znajdującego się w kampusie Uniwersytetu Almería w Hiszpanii. Badania obejmowały dwa horyzonty prognozy – jeden o wielkości pojedynczej próbki, drugi na sześćdziesiąt próbek do przodu (dane stanowiły szeregi czasowe o interwale jednej minuty). [5] W obu przypadkach prognozowanie miało zatem charakter krótkoterminowy. Oznacza to konieczność użycia danych wejściowych modelu dostosowanych do krótkiego horyzontu predykcji. Więcej na temat ich doboru odnaleźć można w: [9].

Również badania autorstwa R. Kumar et al. potwierdzają możliwość prognozy zapotrzebowania na energię z godzinowym wyprzedzeniem. Autorzy zastosowali podobnie jak w [8] między innymi dane pogodowe, uzupełniając je informacjami o parametrach technicznych nieruchomości, takich jak np. powierzchnia pomieszczeń. [10]

3.2. Modelowanie solarnych systemów chłodniczo-grzewczych

Zyskującymi w ostatnim czasie na popularności są systemy klimatyzacji funkcjonujące w oparciu o energię słoneczną. Ich niezaprzeczalną zaletą jest pokrywanie się szczytowego zapotrzebowania na energię z największą jej dostępnością. Badania autorstwa S. Rosiek i F.J. Batlles [11] potwierdziły możliwość precyzyjnego określenia wydajności systemów solarnego zasilania urządzeń klimatyzacyjnych i grzewczych za pomocą ANN. Autorzy za cel postawili sobie stworzenie modelu prognostycznego bazującego na możliwie niewielkiej liczbie zmiennych wejściowych. Jako zmienne wyjściowe zostały zastosowane m.in. następujące szeregi czasowe: (i) współczynnik wydajności zdefiniowany jako iloraz ciepła pobranego przez parownik do ciepła dostarczonego przez generator, (ii) wydajność systemu obliczona jako iloraz zdolności chłodzenia i użytecznej energii kolektorów.

4. PROGNOZOWANIE CZYNNIKÓW ATMOSFERYCZNYCH

Jak zostało to omówione w rozdziale 3.1 jednymi z głównych czynników określających zapotrzebowanie na energię są temperatura oraz wiatr. Również i one stają się przedmiotem modelowania za pomocą ANN.

4.1. Modelowanie prędkości wiatru

Przewidywaniu prędkości wiatru jest poświęcona między innymi praca [12], w której autorzy za pomocą ANN

dokonali godzinowej prognozy jego średniej prędkości. Użyty model jako zmienne objaśniające wykorzystywał czternaście opóźnionych wartości prędkości wiatru. Uzyskany w badaniu błąd średniokwadratowy wyniósł dla zbioru testowego 1.341 m/s (z oczywistych względów był on zauważalnie mniejszy w przypadku zbioru uczącego, dla którego jego wartość wyniosła 1.288 m/s). Zastosowana ANN miała budowę MLP o trzech warstwach. Testom poddano ANN zawierające 5, 10, 15, 20, 30 oraz 50 neuronów w pojedynczej warstwie ukrytej. Najlepsza okazała się być ANN o 15 omawianych komórkach nerwowych uczona w czasie 2000 epok (jedna epoka to prezentacja ANN wszystkich danych z danego zbioru – w tym przypadku uczącego). [12]

Przykładem udanego modelowania siły wiatru o charakterze średnioterminowym jest praca S. Kalogirou et al. [13] Horyzont predykcji wyniósł jeden miesiąc. Taka też była częstotliwość użytych szeregów czasowych. Badania objęły dane pochodzące ze stacji pomiarowych umieszczonych na wysokości 2 oraz 7 m. Maksymalne rozbieżności między wartościami rzeczywistymi a prognozowanymi nie przekraczały 1.8%. Na podkreślenie zasługuje fakt, że autorzy użyli co prawda MLP o jednej warstwie ukrytej, to jednak nie miała ona typowej budowy. Składała się bowiem z trzech osobnych sekcji komórek nerwowych, z których każda sekcja pracowała wykorzystując inne funkcje aktywacji (były to odpowiednio: funkcja Gaussa, dopełnienie funkcji Gaussa, tangens hiperboliczny). [13] Pewną wadą badań jest niewykorzystanie przez autorów tzw. zbioru walidacyjnego (tą nazwą w omawianym opracowaniu jest określany zbiór testowy spełniający inne zadanie). Jego użycie pozwoliłoby wyeliminować ryzyko przeuczenia się ANN w wyniku zbyt długotrwałego treningu.

Prognozowanie przy użyciu ANN w oparciu o informacje z wielu stacji pogodowych zostało zaprezentowane w pracy M. Bilgili et al. [14] Autorzy wykorzystując dane godzinowe z ośmiu stacji pomiarowych obliczyli dla każdej z nich średnie miesięczne wartości prędkości wiatru. Wszystkie stacje dokonywały pomiarów na tej samej wysokości – 10 m. Kolejnym krokiem było wyznaczenie współczynników korelacji między danymi z poszczególnych stacji. Ich wartość jest związana bezpośrednio z morfologią terenu między stacjami oraz w ich okolicy. Jako zmienne objaśniające modelu wybrano informacje o sile wiatru pochodzącej ze stacji o wysokich wartościach współczynników korelacji ze stacją modelowaną. W zależności od jej wyboru ilość stacji dostarczających zmienne wejściowe wahała się od dwóch do pięciu. Dodatkowo zbiór zmiennych objaśniających został rozszerzony o informację o numerze miesiąca, w którym zostały odczytane wartości prędkości wiatru. Zastosowana została sieć typu MLP o dwóch warstwach ukrytych. Ilość użytych w nich komórek nerwowych oscylowała w przedziałach od 6 do 12 oraz od 3 do 6 odpowiednio dla pierwszej i drugiej warstwy ukrytej.

Neurony zostały zbudowane na bazie logistycznej oraz liniowej funkcji aktywacji. Poprawność modelu została oszacowana za pomocą średniego bezwzględnego błędu procentowego, którego wartość wyniosła 4.49% dla najlepszego przypadku oraz 14.13% dla najgorszego. Należy zauważyć, że o ile otrzymane wyniki są wysoce zadowalające, to jednak podobnie jak w [13] autorzy nie zastosowali w procesie treningu sieci zbioru walidacyjnego, co mogło skutkować albo przeuczeniem ANN albo spowodowanym chęcią jego uniknięcia zbyt krótkim treningiem. Obie sytuacje oznaczają iż potencjał ANN mógł nie zostać w pełni wykorzystany.

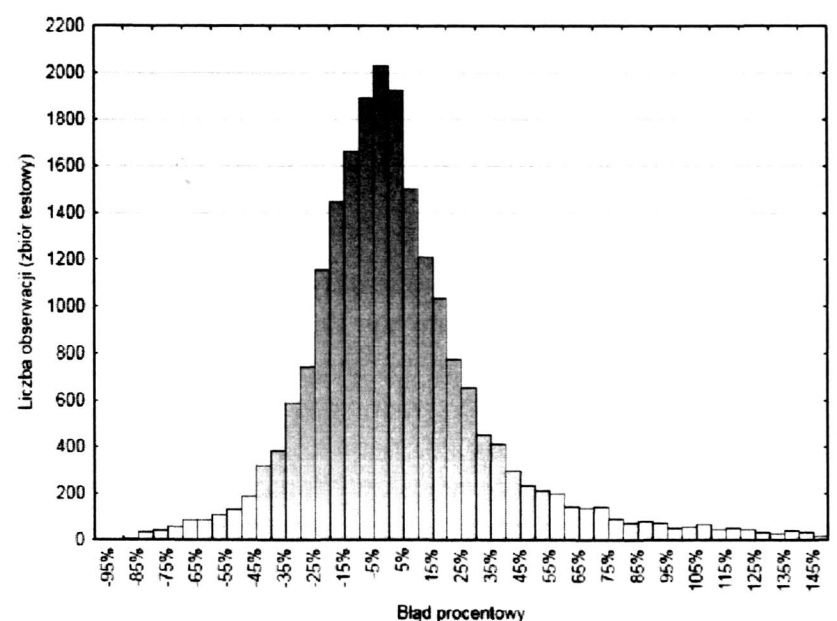
W przypadku korzystania z funkcjonujących już stacji pomiaru prędkości wiatru pewnym problemem może okazać się wysokość, na której usytuowane są czujniki pomiarowe. W oczywisty sposób powinna ona korespondować z wysokością budynku, a tym samym jego ekspozycją na czynnik wiatru. W przypadku niskich budynków zazwyczaj nie stanowi to istotnego problemu, jednak w przypadku budownictwa wysokościowego pomiar dokonywany na wysokości kilku metrów może nie być reprezentatywny. Instalowanie stacji pomiaru na większej wysokości byłoby rozwiązaniem optymalnym. Jeśli jednak takie jej umiejscowienie nie jest uzasadnione ze względów ekonomicznych sugeruje się dokonanie kilku pomiarów na niższych wysokościach i stworzenie profilu pionowego wiatru. [15]

4.2. Przewidywanie temperatury powietrza

Jak wskazują badania ANN sprawdzają się w roli systemu predykcyjnego wartości temperatury. W badaniach opisanych w [16] autorzy zaprezentowali model MLP używający w roli zmiennych objaśniających szeregi czasowe z roku 2009 w postaci: (i) temperatury powietrza, (ii) punktu rosy, (iii) wilgotności, (iv) ciśnienia na poziomie morza, (v) widoczności, (vi) prędkości wiatru, (vii) prędkości wiatru w porywach, (viii) wielkości opadów. Wyniki badań nie tylko potwierdziły możliwość dokonania skutecznej prognozy wartości temperatury powietrza, lecz również wykazały że jej jakość jest porównywalna, a często nawet wyższa niż w przypadku tradycyjnych prognoz. Ten sam rodzaj ANN został użyty w badaniach Kumar Abhishek et al. [17] Dodatkowo autorzy użyli około 20% losowo pobranych danych celem stworzenia tak zwanego zbioru walidacyjnego, którego użycie zapobiega sytuacji przeuczenia się ANN (więcej na temat zasad podziału danych na zbiory: uczący, walidacyjny i testowy można odnaleźć między innymi w [18]). Analogiczne podejście (25% danych tworzyło zbiór walidacyjny) zostało zaprezentowane w [19]. Autorzy stworzyli precyzyjny model prognostyczny funkcjonujący na podstawie danych godzinowych. Podobnie jak w poprzednio przywołanych opracowaniach została użyta architektura MLP.

5. EMPIRYCZNE MODELOWANIE PRĘDKOŚCI WIATRU NA PRZYKŁADZIE DANYCH ZE STACJI METEOROLOGICZNEJ LOTNISKA LUBLINEK W ŁODZI

Celem badania empirycznego było stworzenie modelu ANN prognozującego prędkość wiatru z półgodzinnym wyprzedzeniem. Dane meteorologiczne pochodziły ze stacji pomiarowej zlokalizowanej na terenie lotniska Lublinek w Łodzi i obejmowały zakres czasowy od 1 stycznia 2008 roku do 11 sierpnia 2016 roku (interwał 30 minutowy). Podczas symulacji wykorzystano między innymi zmienne wejściowe powstałe poprzez wykorzystanie narzędzi zaadaptowanych z analizy technicznej. Wiązało się to z koniecznością użycia opóźnionych wartości zmiennych wejściowych. Niezbędnym było zatem zredukowanie ilości danych wprowadzanych do symulatora o 48 próbek wymaganych do stworzenia wspomnianych zmiennych objaśniających. Powstałe dane zostały podzielone na trzy zbiory – uczący (70%), walidacyjny (15%) oraz testowy (15%). Dobór zmiennych wejściowych modeli w wysokim stopniu przeprowadzony został w sposób doświadczalny w oparciu zarówno o badania literaturowe jak i 20-letnie doświadczenie autora w budowie i optymalizacji ANN.

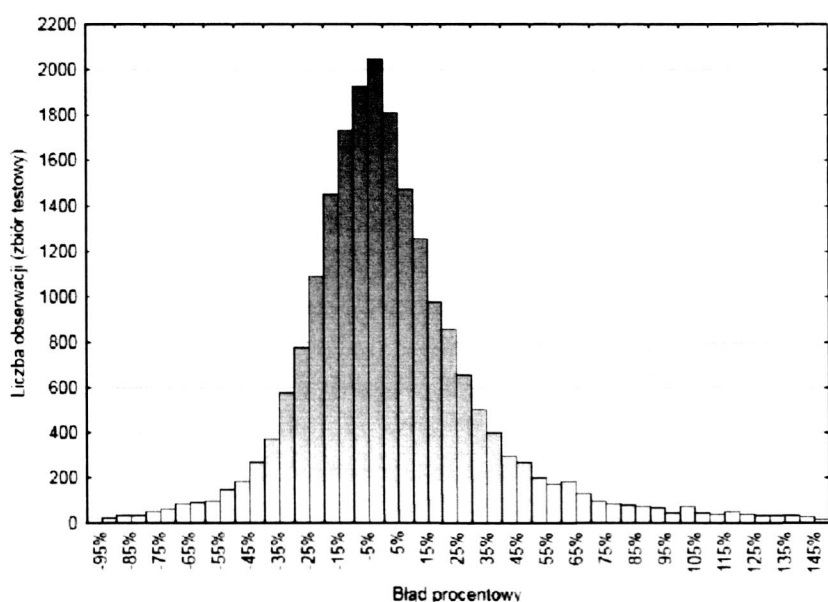


Rys. 3. Histogram błędu procentowego dla prognozy danych ze zbioru testowego – model nr 1 (MLP 10-11-1)

Fig. 3. Percentage error histogram of the prediction for data from the test set – the model no. 1 (MLP 10-11-1)

Rys. 3 przedstawia histogram błędu procentowego prognozy prędkości wiatru o horyzoncie 30 minut dokonanej dla danych ze zbioru testowego przez MLP o architekturze 10-11-1 (liczba neuronów kolejno w warstwach: wejściowej, ukrytej, wyjściowej). Neurony warstwy ukrytej zostały zbudowane przy użyciu funkcji aktywacji w postaci tangensa hiperbolicznego. Pojedynczy neuron wyjściowy wyposażony był w funkcję wykładniczą. Jako zmiennych objaśniających użyto sześciu opóźnionych wartości szeregu czasowego (o interwale 30 minut) zawierającego prędkość

wiatru, wartości opóźnionej o 30 minut temperatury powietrza, kierunku wiatru (sprzed 30 minut) reprezentowanego jako liczby od 1 do 16 (17 w przypadku wiatru zmiennego oraz 0 przy jego braku), numeru dnia roku oraz wartości liczbowej (zmiennoprzecinkowej) reprezentującej godzinę i minutę (0 – godzina 0:00, 1 – godzina 24:00). Uzyskane wyniki wskazują, że zdecydowanie najbardziej liczny jest przedział błędu prognozy od -5% do 0%. Na kolejnych miejscach znajdują się kolejno przedziały błędu od 0% do 5% oraz od -10% do -5%. Można zatem przyjąć, że błąd związany ze znaczną liczbą prognoz mieści się w przedziale od -10% do 5%, co w przypadku średniej wartości wiatru wynoszącej dla zbioru testowego 3.13 m/s oznacza niedokładność w przedziale od -0.31 m/s do 0.16 m/s. Niestety w przypadku znacznej ilości prognoz błąd dochodzi do wartości +/- 25%, a to oznacza już niedokładność prognozy sięgającą nawet 0.78 m/s.



Rys. 4. Histogram błędu procentowego dla prognozy danych ze zbioru testowego – model nr 2 (MLP 10-11-1)

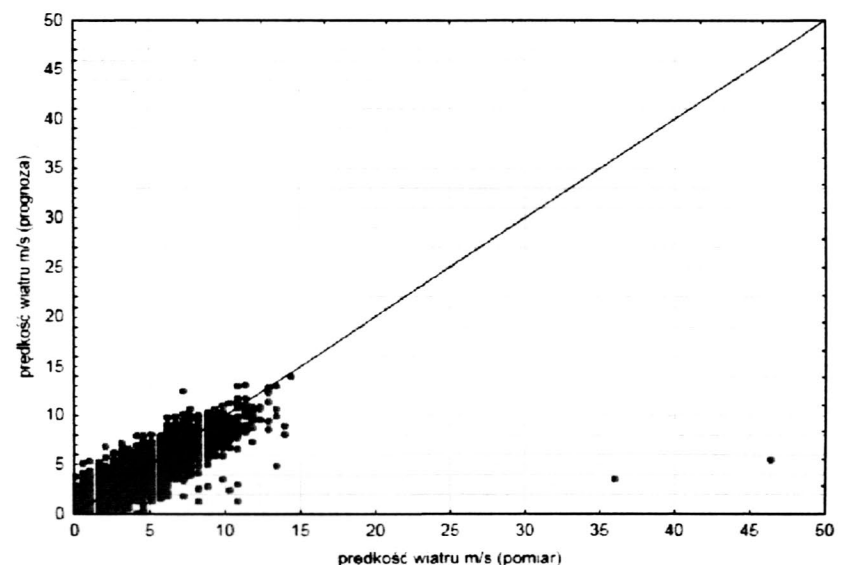
Fig. 4. Percentage error histogram of the prediction for data from the test set – the model no. 2 (MLP 10-11-1)

Dalszą optymalizację modelu udało się osiągnąć poprzez modyfikację zbioru zmiennych objaśniających. Oprócz – tak jak poprzednio – sześciu opóźnionych wartości prędkości wiatru oraz wartości liczbowej reprezentującej godzinę i minutę zastosowano zmianę ciśnienia między 30, a 60 minutami przed prognozowaną chwilą, średnią wartość prędkości wiatru w ciągu 24 godzin poprzedzających moment prognozy oraz średnią prędkość wiatru w ciągu ostatnich 3 godzin. Nowe zbiory danych wejściowych podobnie jak w poprzednio opisanym modelu zawierały dziesięć zmiennych. Uzyskany rozkład błędu procentowego przedstawia rys. 4.

W stosunku do poprzedniego modelu zmniejszeniu uległa liczba prognoz obarczonych błędem większym niż 25%. Szczególnie jest to widoczne w przypadku niedoszacowania przez ANN rzeczywistej prędkości wiatru. Liczba prognoz o najwyższej precyzji pozostała na zbliżonym poziomie.

W badaniach testom poddano liczne zbiory zmiennych wejściowych bazujące na innych, niż opisane, wskaźnikach wywodzących się z analizy technicznej. W szczególności użyte zostały oscylatory mające za zadanie określenie tempa zmian zmiennych wejściowych. Nie spowodowały one jednak podwyższenia jakości predykcji.

Wszystkie testowane modele ujawniły problem z przewidywaniem wiatru o wysokich wartościach, zdecydowanie wykraczających poza średnie. Na rys. 5 zaprezentowano wykres rozrzutu dla drugiego z opisanych modeli. Widoczne są dwa punkty reprezentujące wiatr o prędkości powyżej 35 m/s. Sytuacje te nie zostały prawidłowo przewidziane przez ANN. Przedstawione modele sieci funkcjonują poprawnie przy typowych warunkach wiatrowych, natomiast sytuacje ekstremalne nie są prognozowane z oczekiwaną precyzją (co szczególnie widoczne jest na rys. 5 – dwa punkty w prawym, dolnym rogu nieposiadające swoich „odpowiedników” w lewym, górnym rogu wykresu). Może to wynikać z wielu powodów, lecz przede wszystkim należy zwrócić uwagę że w zbiorze danych uczących tak ekstremalne wartości prędkości wiatru występują sporadycznie, a co za tym idzie nie istnieje wystarczająca liczba wzorców umożliwiająca poprawą naukę ANN w tym zakresie. Problem zatem wydaje się wynikać nie z wysokiej prędkości wiatru, co z rzadkości tego zjawiska.



Rys. 5. Wykres rozrzutu – model nr 2 (MLP 10-11-1)

Fig. 5. Scatter diagram – the model no. 2 (MLP 10-11-1)

6. WNIOSKI

Przeprowadzone badania, zarówno o charakterze literaturowym, jak i empirycznym, potwierdziły możliwość dokonania prognozy prędkości wiatru za pomocą ANN z wysoką precyzją. Jak wykazały symulacje przeprowadzone przez autora na podstawie danych meteorologicznych pochodzących ze stacji pomiarowej zlokalizowanej na terenie lotniska Lublinek w Łodzi wykorzystanie wybranych wskaźników pochodzących z analizy technicznej (której pierwotnym celem jest analizowanie zmian cen na rynkach

finansowych) przyczynia się do poprawy jakości prognoz. W szczególności przydatne okazały się być proste średnie ruchome. Jednocześnie zostały potwierdzone omawiane w literaturze przedmiotu problemy z przewidywaniem skrajnych wartości prędkości wiatru. Przy prędkościach przekraczających 35 m/s prognozy posiadały nieakceptowalny poziom precyzji.

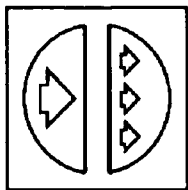
ANN stanowią także precyzyjne narzędzie przewidujące zapotrzebowania na energię w budynkach. Jako źródło danych mogą zostać użyte prognozy meteorologiczne uzyskane za pomocą ANN. Kompleksowy system modelujący pobór energii elektrycznej w budynkach może być zbudowany z kilku współpracujących ze sobą sieci. Zarówno badania własne autora, jak i analiza literatury przedmiotu potwierdziły potencjał tkwiący w sieciach o architekturze MLP. Uzyskane przez nie wyniki były nieznacznie lepsze niż w przypadku sieci typu RBF oraz GRNN. Dalszej optymalizacji prognoz należy poszukiwać w obszarze modyfikacji zbioru zmiennych objaśniających, szczególnie poprzez zastosowanie kolejnych zmiennych wskaźnikowych.

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN MODELING WIND SPEED AS A DETERMINANT OF ENERGY CONSUMPTION IN BUILDINGS

Summary: The paper presents possibilities to use ANN as a model predicting both – demand for energy in buildings and meteorological parameters affecting that demand such as wind speed. Empirical studies included wind speed forecasts using weather data from a meteorological station located at Lublinek Airport in Lodz. Numerous ANN types such as MLP, RBF and GRNN were tested during simulations.

Literatura

- [1] Jasiński T. *Niezawodność oraz metody jej zwiększania w różnych modelach rynku* [w:] A.T. Szablewski, M. Martin (red.) *Ekonomiczne, regulacyjne, strukturalne i technologiczne uwarunkowania bezpieczeństwa energetycznego*. Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź 2011, 199-219
- [2] Jasiński T. *Przegląd architektur sztucznych sieci neuronowych wykorzystywanych w ekonomii do przewidywania szeregów czasowych*, *Studia i prace Kolegium Zarządzania i Finansów*, SGH, zeszyt naukowy 35 (2003) 166-177
- [3] Jasiński T., Ścianowska A. *Security Assessment and Optimization of Energy Supply*, *Oeconomia Copernicana*, vol. 6, issue 2 (2015) 129-141
- [4] Aydinalp M., Ugursal V.I., Fung A.S. *Modeling of the space and domestic hot water heating energy consumption in the residential sector using neural networks*, *Applied Energy*, nr 79 (2004) 159-178
- [5] Mena R., Rodriguez F., Castilla M., Arahal M.R. *A prediction model based on neural networks for the energy consumption of a bioclimatic building*, *Energy and Buildings* 82 (2014) 142-155
- [6] Eriksson N. *Predicting demand in district heating systems. A neural network approach*, School of Engineering and Department of Physics and Astronomy, Uppsala University, Uppsala, Sweden, UPTec F12015 (2015)
- [7] Geletka V., Sedlakova A. *Impact of Shape Of Buildings on Energy Consumption*, *Czasopismo Techniczne Budownictwo*, zeszyt 3, r. 109 (2012) 123-129
- [8] Jasiński T. *Prognozowanie zapotrzebowania na energię ciepłą przy użyciu sztucznych sieci neuronowych* [w:] A.T. Szablewski (red.) *Rynkowe i technologiczne oraz regulacyjne uwarunkowania rozwoju krajowego sektora ciepłowniczego*. Dom Wydawniczy ELIPSA, Warszawa 2016, 196-203
- [9] Jasiński T. *Dane wejściowe sztucznych sieci neuronowych prognozujących krótkoterminowe zapotrzebowanie na energię*, *Logistyka*, nr 6 (2014)
- [10] Kumar R., Aggarwal R.K., Sharma J.D. *Estimation of Total Energy Load of Building Using Artificial Neural Network*, *Energy and Environmental Engineering* 1(2) (2013) 25-35
- [11] Rosiek S., Batlles F.J. *Modelling a solar-assisted air-conditioning system installed in CIESOL building using an artificial neural network*, *Renewable Energy* 35 (2010) 2894-2901
- [12] Fonte P.M., Silva G.X., Quadrado J.C. *Wind Speed Prediction using Artificial Neural Networks*, *Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conf. on Neural Networks*, Lisbon, Portugal, June 16-18 (2005) 134-139
- [13] Kalogirou S.A., Neocleous C., Paschiardis S., Schizas C. *Wind Speed Prediction Using Artificial Neural Networks*, *Proceedings of the European Symposium on Intelligent Techniques ESIT'99 na CD-ROM*, Crete, Greece (1999)
- [14] Bilgili M., Sahin B., Yasar A. *Application of artificial neural networks for the wind speed prediction of target station using reference stations data*, *Renewable Energy* 32 (2007) 2350-2360
- [15] Jąderko A., Kowalewski M.K. *Wyznaczanie parametrów wiatru w energetyce odnawialnej*, *Przegląd Elektrotechniczny*, r. 91, nr 1 (2015) 148-151
- [16] Santhosh Baboo S., Kadar Shereef I. *An Efficient Weather Forecasting System using Artificial Neural Network*, *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 1, nr 4, October (2010) 321-326
- [17] Kumar Abhishek, Singh M.P., Saswata Ghosh, Abhishek Anand *Weather forecasting model using Artificial Neural Network*, *Procedia Technology* 4 (2012) 311-318
- [18] Leszczyński Z., Jasiński T. *Inżynieria kosztów*, ODDK, Gdańsk (2015)
- [19] Kadu P.P., Wagh K.P., Chatur P.N. *Temperature Prediction System Using Back propagation Neural Network: An Approach*, *International Journal of Computer Science & Communication Networks*, Vol 2(1) (2012) 61-64



WYSYCHANIE ZASOLONEJ CERAMIKI ZABYTKOWEJ

Jan KUBIK*, Agnieszka BUŁKA

*Politechnika Opolska, Katedra Fizyki Materiałów
ul. Katowicka 48, 45-061 Opole, e-mail: j.kubik@po.opole.pl, agnieszkabulka@wp.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ zasolenia na kinetykę wysychania ceramiki budowlanej. Podjęto próbę wykazania, iż stopień zasolenia znacząco wpływa na szybkość wysychania zabytkowej cegły.

Słowa kluczowe: fizyka budowli, zasolenie, kinetyka wysychania

1. WPROWADZENIE

Ze wszystkich substancji chemicznych to woda ma największe zastosowanie w budownictwie. Wprowadzana jest do obiektów na szereg różnych sposobów. Nie tylko poprzez zastosowanie i wbudowanie materiałów budowlanych, ale również poprzez opady atmosferyczne, podciąganie z gruntu itp. Niemniej jednak sama woda nie przyczynia się bezpośrednio do destrukcji obiektów zabytkowych. W połączeniu z rozpuszczalnymi solami transportowanymi za pomocą wody prowadzi do o wiele poważniejszych procesów powodujących zniszczenia zabytkowej materii. Występujące w materiale budowlanym sole rozpuszczalne w wodzie ulegają krystalizacji w czasie jego wysychania. Woda wraz z solami odparowuje z porów przypowierzchniowych danego materiału i w wyniku wzrostu stężenia roztworu sole zaczynają krystalizować. Jeśli proces wysychania przebiega wolno w niskiej temperaturze, dość znacznej wilgotności powietrza, to krystalizacja soli na powierzchni materiału widoczna jest w formie wykwitów. Natomiast w przypadku, gdy materiał wysycha szybko w warunkach wysokiej temperatury, małej wilgotności powietrza następuje wysychanie w głąb, a krystalizacja soli odbywa się w wewnętrznych porach. Taki rodzaj krystalizacji soli powoduje o wiele większe zniszczenia w strukturze materiału jak również zjawisko to ma wpływ na czas wysychania zawilgoconego obiektu. Z tego powodu w artykule opisano badanie wpływu stopnia zasolenia na kinetykę wysychania zabytkowej ceramiki.

2. BADANIA LABORATORYJNE

W celu opisanie wpływu stopnia zasolenia na czas wysychania materiału ceramicznego przeprowadzono kilka cykli nasączania i wysychania z wykorzystaniem cegły zabytkowej.

Do badania użyto trzy rodzaje próbek ceglanych pochodzących z różnych epok. Pierwsza grupa próbek, to cegły z XVIII w. (nr 1-5). Drugie datowane na początek XX w. (nr I-V). Trzecia grupa próbek, to cegła współczesna (nr 1.1-1.5).

Próbki moczo w wodnym roztworze siarczanu sodu (Na_2SO_4) w trzech etapach; zwiększając stężenie soli z 1% do 3% i 6% wykonując pomiary aż do pełnego nasycenia. Badane próbki suszono w komorze klimatycznej w trzech cyklach wilgotnościowych: 40%, 60% i 65%, przy temperaturze 20°C dla wszystkich cykli pomiarowych. Krzywe przedstawiające proces wysychania próbek w czasie wraz z aproksymacją wyników pomiarowych przedstawiono na wykresach (rys. 2,3,4). Natomiast wyniki eksperymentu stanowią podstawę do wyliczenia współczynników kinetyki narastania zasolenia w zabytkowej ceramice. Wyniki te mają podstawowe znaczenie w diagnostyce stanu zachowania powierzchni zabytkowej ceramiki.

2.1. Opis procesu wysychania

Rys. 1 przedstawia dwa etapy procesu wysychania badanych próbek. Pierwszy z nich charakteryzuje się stałą szybkością schnięcia i jest to wysychanie konwekcyjne według równania:

$$C(t) = [C_1 - \frac{C_1 - C_2}{t_2 - t_1}(t - t_1)]F(t) \quad (1)$$

Natomiast w drugim etapie widoczna jest malejąca szybkość schnięcia i jest to wysychanie dyfuzyjno-konwekcyjne:

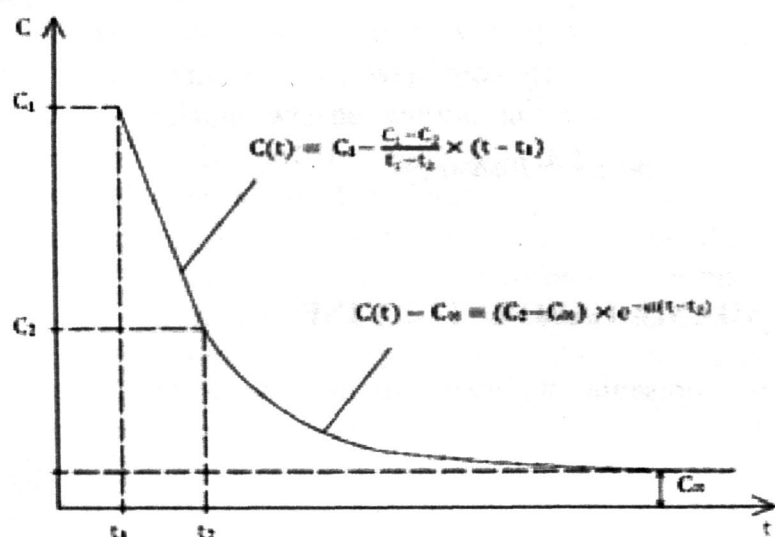
*Autor korespondencyjny, e-mail: j.kubik@po.opole.pl

$$C(t) = [C_{\infty} + (C_2 - C_{\infty})e^{-\alpha(t-t_2)}]F(t) \quad (2)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{1}{(t-t_2)} \ln \frac{C(t)-C_{\infty}}{C_2-C_{\infty}} \quad (3)$$

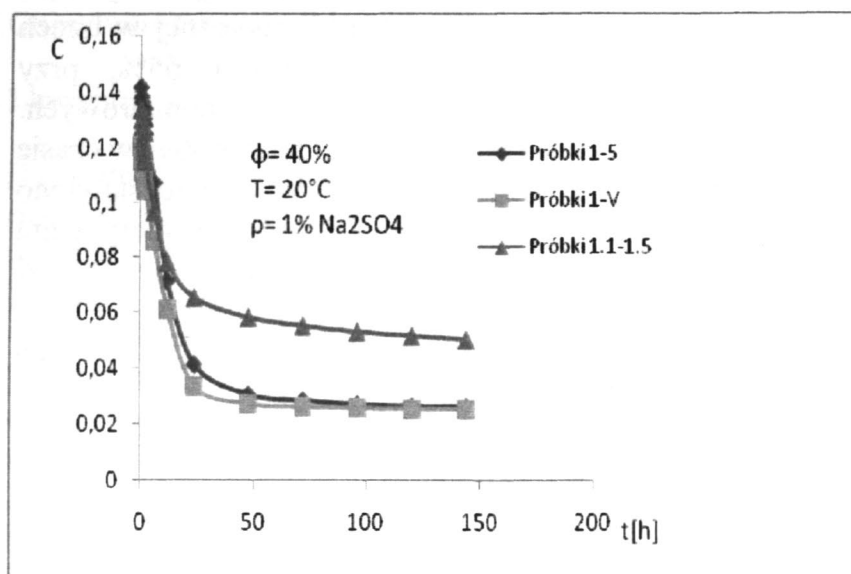
na podstawie którego wyliczono współczynniki kinetyki procesu. Natomiast $F(T)$ jest funkcją starzenia się materiału, zależną od wieku zabytku T ($T \gg t$). Funkcja ta opisuje długotrwałe zmiany materiału zabytku.



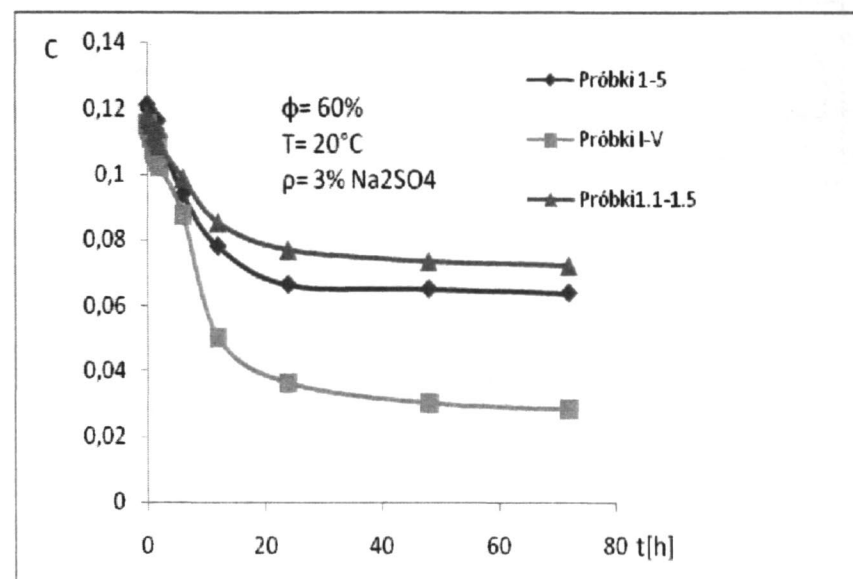
Rys. 1. Schemat wysychania próbek ceglanych
Fig. 1. Scheme of brick samples drying

2.2. Wyniki pomiarów

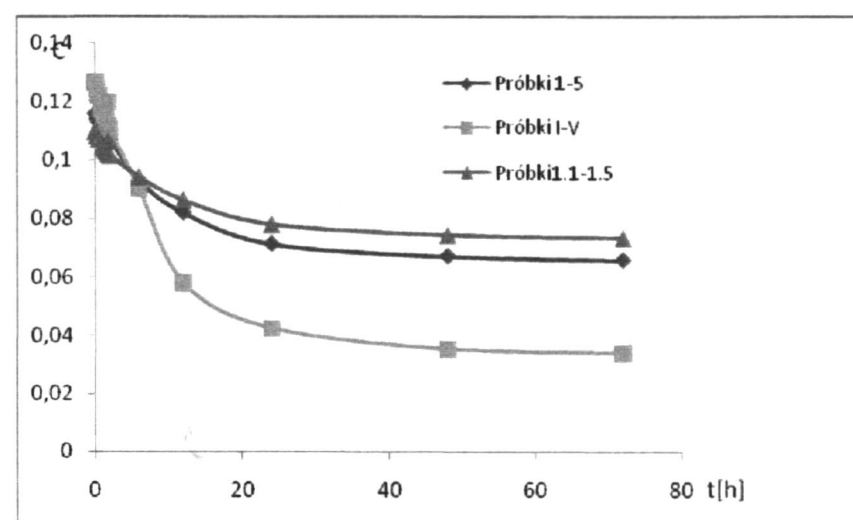
W wyniku eksperymentu uzyskano następujące rezultaty:



Rys. 2. Krzywa suszenia próbki ceglanej
Fig. 2. Curve of the brick sample drying



Rys. 3. Krzywa suszenia próbki ceglanej
Fig. 3. Curve of the brick sample drying

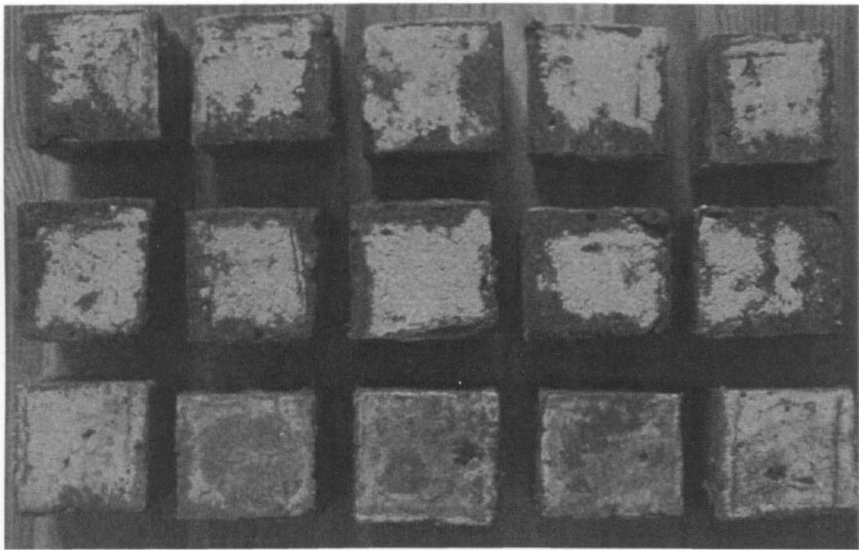


Rys. 4. Krzywa suszenia próbki ceglanej
Fig. 4. Curve of the brick sample drying

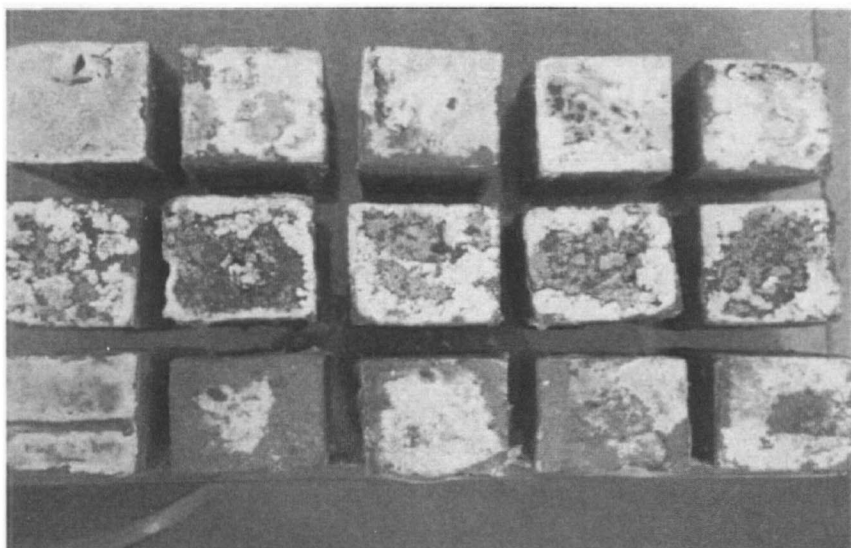
Tabela 1. Tabela wartości współczynnika kinetyki wysychania próbek

Table 1. The table of kinetics ratio of brick samples drying

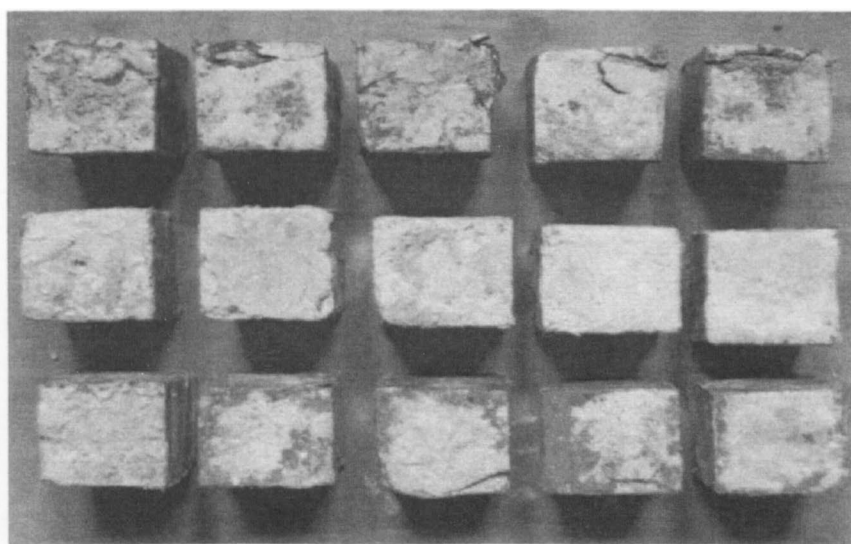
Wilgotność	Nr próbki	Stężenie soli		
		1%	3%	6%
40%	1-5	0,021	0,002	0,008
	I-V	0,025	0,002	0,003
	1.1-1.5	0,011	0,001	0,004
60%	1-5	0,029	0,002	0,003
	I-V	0,024	0,016	0,022
	1.1-1.5	0,016	0,004	0,006
65%	1-5	0,026	0,010	0,053
	I-V	0,016	0,015	0,022
	1.1-1.5	0,004	0,002	0,005



Rys. 5. Wygląd próbek po 1 cyklu eksperymentu
Fig. 5. Illustration of samples after 1th test cycle



Rys. 6. Wygląd próbek po 2 cyklu eksperymentu
Fig. 6. Illustration of samples after 2th test cycle



Rys. 7. Wygląd próbek po 3 cyklu eksperymentu
Fig. 7. Illustration of samples after 3th test cycle

2. WNIOSKI

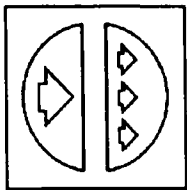
W eksperymencie mierzono ubytki wilgoci w czasie, w próbkach zabytkowych cegieł o zróżnicowanym zasoleniu. Na podstawie wyników wyliczono współczynnik kinetyki wysychania, na podstawie którego można zdiagnozować wpływ zasolenia na czas wysychania ceramiki. Jednoznacznie można przyjąć, że im większe stężenie soli w materiale tym współczynnik kinetyki rośnie, a jednocześnie proces wysychania przebiega wolniej.

KINETICS OF SALTETED CERAMICS DRYING

Summary: This paper intends to report the experimental work carried out with brick specimens, aiming to evaluate the effect of salt solution in the capillary absorption of brick specimen in comparison with water. Also the experiment was conducted to define the kinetics ratio of brick samples drying and determine the influence on the degradation of historical material.

Literatura

- [1] Domasłowski W. *Zabytki kamienne i metalowe, ich niszczenie i konserwacja profilaktyczna*. Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2011
- [2] Domasłowski W., Łukaszewicz J. *Badania nad konserwacją murów ceglanych*. Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2004
- [3] Kubik J. *Przepływ wilgoci w materiałach budowlanych*. Oficyna Wydawnicza PO, Opole 1999
- [4] Kubik J. *Trwałość zabytków. Studia z zakresu fizyki budowli*. Łódź 2006
- [5] Rouba B.J. *Pielęgnacja świątyni i innych zabytków*. Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2014
- [6] Domasłowski W. *Test krystalizacyjny jako miernik odporności kamieni na działanie soli rozpuszczalnych w wodzie*. Zeszyty Konserwatorskie nr 129, Wydawnictwo UMK, Toruń 1983
- [7] Kubik J. *Bilans wilgoci w zabytkach*. Roczniki Inżynierii Budowlanej, zeszyt nr 12, Katowice-Opole 2012
- [8] Kucharczyk A. *Przepływy roztworów soli w zabytkowych budynkach*. P.O. Opole 2016
- [9] Kucharczyk A. *Diagnostyka murów Kościoła Franciszkanów w Opolu*, Roczniki Inżynierii Budowlanej, zeszyt 8, Katowice-Opole 2009
- [10] Kubik J., Kucharczyk A. *Ogólne własności przepływów przypowierzchniowych*. Roczniki Inżynierii Budowlanej, zeszyt 8, Katowice-Opole 2009



WPLYW KONFIGURACYJNYCH ROZWIĄZAŃ WARSTWY PRZESZKLENIA NA ENERGETYCZNE FUNKCJONOWANIE ZMODYFIKOWANEJ PRZEGRODY KOLEKTOROWO – AKUMULACYJNEJ

Lech LICHOLAI*, Aleksander STARAKIEWICZ, Joanna KRASON, Przemysław MIĄSIK

*Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego ul. Poznańska 2, 35-955 Rzeszów,
e-mail: Lech.Licholai@prz.edu.pl, olekstar@prz.edu.pl, jkras@prz.edu.pl, pmiasik@prz.edu.pl*

Streszczenie: Przy projektowaniu i wznoszeniu budynków istotną uwagę przywiązuje się do energooszczędnych zagadnień, dotyczących eksploatacyjnego funkcjonowania tych obiektów. Korzystną charakterystykę energetyczną budynków można osiągnąć przy pomocy różnych metod, mających oparcie w naukowych zagadnieniach fizyki budowli. Przyszłościowym kierunkiem jest wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do poprawy bilansu cieplnego budynków o założonym użytkowym przeznaczeniu. Wśród różnych technologicznych rozwiązań ścian zewnętrznych, przegroda kolektorowo – akumulacyjna jest interesującą propozycją południowych, elewacyjnych struktur budynków.

Celem rozważań, przedstawionych w niniejszym artykule jest określenie wpływu parametrów przeszkleń na pracę cieplną przegrody kolektorowo – akumulacyjnej zawierającej materiał zmienno – fazowy. W badaniach wykorzystano przeszkleń o różnych wartościach współczynników przenikania ciepła oraz przepuszczalności całkowitego promieniowania słonecznego. Przedstawiono interpretację graficzną uzyskanych wyników badań zachowania się przegrody kolektorowo – akumulacyjnej modyfikowanej materiałem zmienno – fazowym oraz trzema rodzajami przeszkleń. Na podstawie wyników badań sformułowano wnioski dotyczące celowości stosowania określonych rozwiązań strukturalno – materiałowych obudowy budynków w warunkach klimatycznych Polski.

Słowa kluczowe: przeszkleń, przegroda kolektorowo – akumulacyjna, materiał zmienno - fazowy, badania doświadczalne

1. WSTĘP

Badania nad wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego do ogrzewania budynków prowadzone są z różną intensywnością od ponad 50 lat w wielu krajach świata. Przechodziły one różne fazy rozwoju związane z poszukiwaniem optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych

i materiałowych. Podstawowe dwa elementy konstrukcyjne przegrody kolektorowo – akumulacyjnej, kolektor i magazyn ciepła, poddawane są ciągłej ewaluacji i badaniom w poszukiwaniu efektywniejszych rozwiązań. Oba te elementy są ściśle ze sobą powiązane poprzez wzajemne oddziaływanie. Od kolektora (przeszklenia) oczekuje się wysokiej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego (g) oraz wysokiej izolacyjności cieplnej (U_g). Od magazynu ciepła oczekuje się wysokiej pojemności cieplnej, dobrego przewodnictwa w czasie nagrzewania, niskich strat ciepła w fazie chłodzenia oraz przekazania jak największej ilości energii cieplnej do wnętrza pomieszczenia. Niektóre parametry fizyczne jakimi charakteryzuje się przeszkleń i materiał akumulacyjny wzajemnie się przeciwstawiają. Dlatego też przeprowadzono badania przegrody kolektorowo – akumulacyjnej zmodyfikowanej materiałem zmienno – fazowym z trzema rodzajami przeszkleń. Celem badań było określenie wpływu danego rodzaju przeszkleń na efektywność cieplną przegrody kolektorowo – akumulacyjnej.

W artykule [1] przedstawiono rozważania dotyczące wyznaczenia stabilności termicznej ściany zewnętrznej modyfikowanej materiałem zmiennofazowym w okresie charakteryzującym się niską temperaturą zewnętrzną i wysokim natężeniem promieniowania słonecznego. Przeprowadzono analizę rozkładu temperatur w przekroju ściany w układzie niestacjonarnym. Zaproponowana w pracy metoda analityczna dotycząca tłumienia amplitudy wahań temperatur przez przegrody modyfikowane warstwą materiału zmiennofazowego pozwoliła na ilościowe określenie możliwości stabilizacji temperatury przegrody poprzez zastosowanie materiału o właściwościach zmiennofazowych. W artykule stwierdzono, że wprowadzenie warstwy materiału zmiennofazowego do przegrody

*Autor korespondencyjny, e-mail: Lech.Licholai@prz.edu.pl

zewnętrznej przyczyniło się do stabilizacji temperatury w zakresie temperatur przemiany fazowej w warstwie materiału zmiennofazowego, jak również do zmniejszenia wahań temperatury w całej przegrodzie. Artykuł [2] zawiera informacje na temat możliwości stosowania materiałów zmiennofazowych w budownictwie, a także wyniki własnych analiz. W artykule przedstawiono technologie integracji materiałów zmiennofazowych z materiałami budowlanymi. Istotną składową artykułu są przeprowadzone obliczenia symulacyjne dynamiki procesów cieplnych zachodzących w przegrodach modyfikowanych materiałami zmiennofazowymi. Analizę wykonano biorąc pod uwagę zmienne warunki otoczenia zewnętrznego wraz z oddziaływaniem promieniowania słonecznego. Interesujące są wnioski odnoszące się do efektywności stosowania takich rozwiązań w polskich warunkach klimatycznych. W artykule [3] zawarto wyniki z badań dotyczących zastosowania materiałów zmiennofazowych w przegrodach kolektorowo-akumulacyjnych. Przedstawiono rezultaty uzyskane z analiz teoretycznych oraz z przeprowadzonych badań eksperymentalnych dotyczących różnych konfiguracji przegród zewnętrznych modyfikowanych materiałem zmiennofazowym. Badania prowadzono w okresie letnim i zimowym. W przegrodzie wykonano otwory umożliwiające cyrkulację powietrza. Zastosowanie materiału zmiennofazowego poprawiło stabilizację termiczną badanych układów przegród zewnętrznych. Artykuł [4] zawiera rozważania dotyczące możliwości zastąpienia grubych i ciężkich ścian zewnętrznych przez cienkie i lekkie przegrody, przy jednoczesnym utrzymaniu podobnego poziomu komfortu przez cały rok. Dla osiągnięcia tej zmiany rozpatrzono w artykule panele z materiałem zmiennofazowym wkomponowane w strukturę ściany zewnętrznej. Analizy funkcjonowania ścian wykonano poprzez modelowanie równowagi energetycznej w pomieszczeniu uwzględniając zyski i straty ciepła przez ściany. Przeprowadzono symulacje dla różnych typów struktury ścian w zmieniających się warunkach pogodowych. Wykazano, że istnieje możliwość stosowania lekkich zewnętrznych ścian wyposażonych w panele z materiałem zmiennofazowym jako alternatywy dla ciężkich, standardowych ścian zewnętrznych. W artykule [5] przedstawiono rozważania dotyczące zastosowania materiałów zmiennofazowych do wspomagania wentylacyjnych systemów w budynkach, dla zmniejszenia konwencjonalnego zapotrzebowania energetycznego przeznaczonego na potrzeby chłodzenia budynków. Zaproponowane w artykule systemy wyposażone w materiały zmiennofazowe zwiększają efektywność funkcjonowania systemów wentylacyjnych w budynkach. W artykule [6] przedstawiono wyniki badań dotyczących funkcjonowania przegrody kolektorowo-akumulacyjnej modyfikowanej materiałem zmiennofazowym. Badania przeprowadzono w komorze z południową ścianą w postaci przegrody kolektorowo-

akumulacyjnej, poddanej oddziaływaniu rzeczywistych parametrów klimatu zewnętrznego. Materiał zmiennofazowy umieszczono od strony zewnętrznej warstwy masowej przegrody kolektorowo-akumulacyjnej wykonanej z elementów ceramicznych. Badania przeprowadzono w krótkim okresie czasowym (miesiąc kwiecień), jednak zarejestrowano zmniejszenie strat ciepła z pomieszczenia znajdującego się za przegrodą kolektorowo-akumulacyjną.

2. METODYKA BADAŃ

Badania zostały przeprowadzone w komorze symulacyjnej, w warunkach laboratoryjnych.

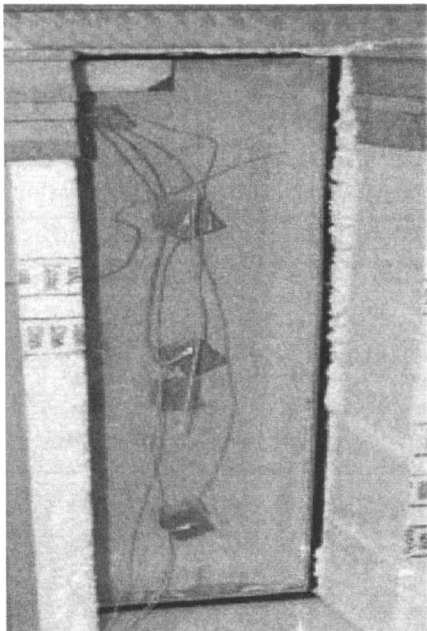
Komora podzielona jest na dwie części badawcze, z których, w jednej założono symulowaną temperaturę powietrza zewnętrznego (komora zimna), w drugiej natomiast temperaturę powietrza wewnętrznego ustaloną dla pomieszczenia użytkowego w budynku (komora ciepła). Pomiędzy komorowe części badawcze wprowadzono przegrodę kolektorowo – akumulacyjną. Od strony komory zimnej podczas badań, oprócz narzuconej temperatury zewnętrznej, symulowano energię cieplną promieniowania słonecznego za pomocą płyty grzejnej. Ogólny widok badanej przegrody przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Widok badanej przegrody od strony komory ciepłej
Fig. 1. View of the testing barrier from hot side

Badania zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu trzech wariantów przegród. Elementem zmiennym było przeszklenie (P1, P2, P3), które charakteryzowało się różnymi parametrami termofizycznymi (izolacyjnością cieplną U_g i całkowitą przepuszczalnością promieniowania słonecznego g).

Celem badań było określenie wpływu danego przeszklenia na ciepłe funkcjonowanie zmodyfikowanej przegrody kolektorowo – akumulacyjnej, po okresie działania płyty grzejnej symulującej energię promieniowania słonecznego.



Rys. 2. Widok badanej przegrody od strony komory zimnej
Fig. 2. View of the testing barrier from cold side

Podczas prowadzonych badań ustalono w komorze zimnej stałą temperaturę 0°C. W komorze ciepłej przyjęto temperaturę +20°C. Natężenie całkowitego promieniowania słonecznego na powierzchnię pionową założono o wartości około 590 W/m². Wielkość tą, przyjęto jako maksymalną dzienną średnią z całego sezonu grzewczego (od października do kwietnia), przy wykorzystaniu typowego roku meteorologicznego dla stacji Rzeszów – Jasionka. Przy każdym wariancie przegrody wartość natężenia promieniowania słonecznego została zredukowana o współczynnik całkowitej przepuszczalności promieniowania słonecznego dla danego przeszklenia. Pomniejszona wielkość została zasymulowana przez płytę grzejną, która została umieszczona między przeszkleniem a warstwą materiału zmienno - fazowego. Rozkład temperatur w przegrodzie określono przy pomocy czujników temperatury umieszczonych w przekroju ściany. Od strony komory ciepłej na powierzchni ściany ceramicznej założono czujniki gęstości strumienia ciepła (Rys.1). Każdy wariant przegrody został poddany działaniu nagrzewania tą samą stałą wartością energii cieplnej przez sześć godzin. Po zakończeniu procesu nagrzewania wykonano analizę - na podstawie wartości temperatur - przejścia fali termicznej przez przegrodę oraz wpływu danego przeszklenia na rozkład tych temperatur.

2.1. Charakterystyka badanych przegród

W przegrodzie kolektorowo – akumulacyjnej założono stałe elementy dla trzech wariantów: mur składający się z ceramiki

poryzowanej grubości 300 mm, warstwa PCM grubości 20 mm, usytuowana od strony komory zimnej. Właściwości fizyczne tych materiałów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości materiałów wykorzystanych w badanych przegrodach
Table 1. The properties of each of the materials used in the studied barriers

Materiał / Parametry fizyczne	Pustak ceramiczny	PCM	Szyba zespolona
Gęstość objętościowa [kg/m ³]	~810	880	P1: 833 P2: 750 P3: 682
Temperatura topnienia [°C]	-	22÷26	-
Temperatura krzepnięcia [°C]	-	26÷22	-
Ciepło właściwe [kJ/kg·K]	1,0	2,0	0,84
Ciepło utajone [kJ/kg]	-	230	-
Współczynnik przewod. ciepła [W/m·K]	0,20	0,20	P1: 0,112 P2: 0,096 P3: 0,035

Przeszklenie charakteryzujące się odmiennymi parametrami, umieszczono za warstwą materiału zmienno - fazowego od strony zimnej. Parametry przeszkleń wykorzystanych w badaniach przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry przeszklenia
Table 2. Parameters of glazing

Rodzaj przeszklenia	Budowa szyby zespolonej	U _g	g	Grubość szyby zespol.
-	-	W/m ² K	%	mm
Szyba zespolona 1-komorowa P1	4/16Ar/4	2,6	83	24
Szyba zespolona 2-komorowa P2	4/14/4/14/4	1,7	76	40
Szyba zespolona 2-komorowa P3	4/16/4/16/4	0,7	62	44

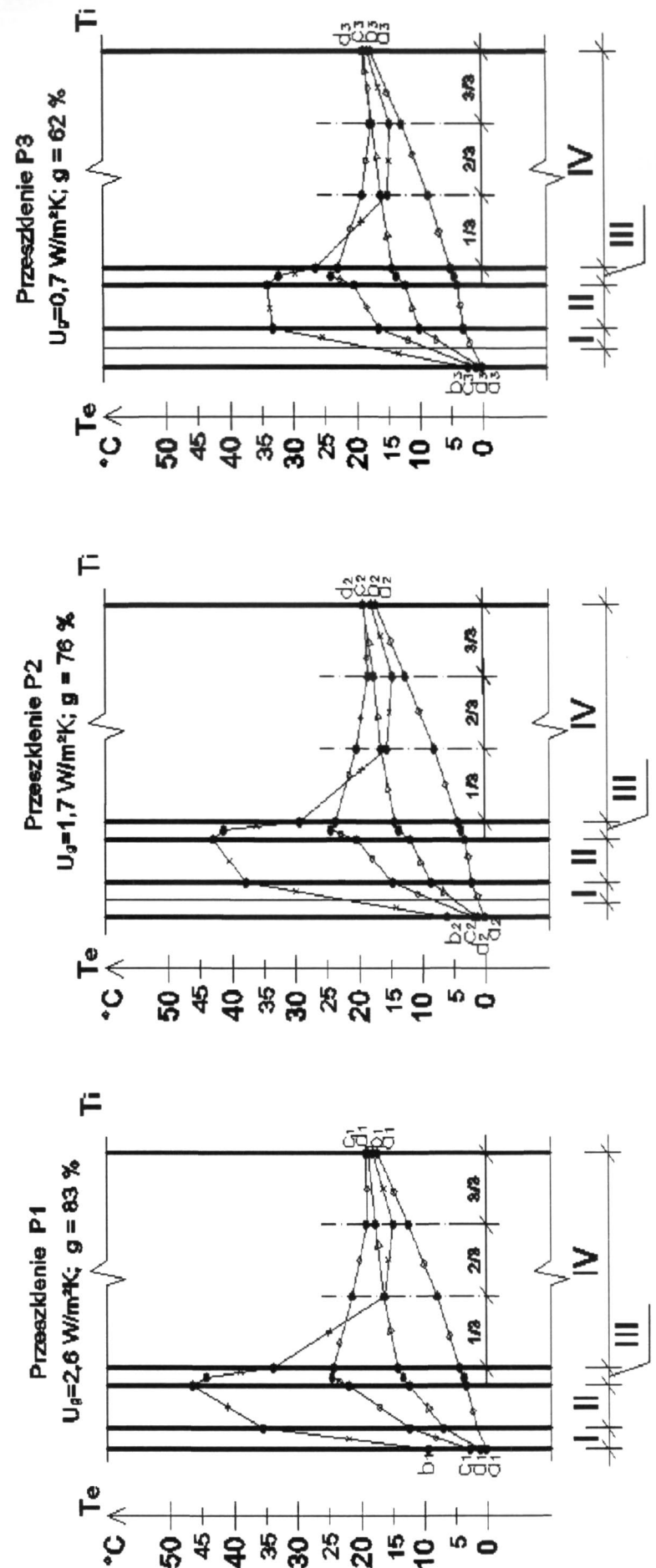
Do przeprowadzenia symulacji całkowitego promieniowania słonecznego między warstwą PCM a przeszkleniem umieszczono płytę grzewczą. Schemat przegrody wraz z usytuowaniem czujników temperatury *T_i* oraz czujników gęstości strumienia ciepła *q* przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zmodyfikowana przegroda kolektorowo – akumulacyjna
Fig. 3. Modified thermal storage wall

3. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

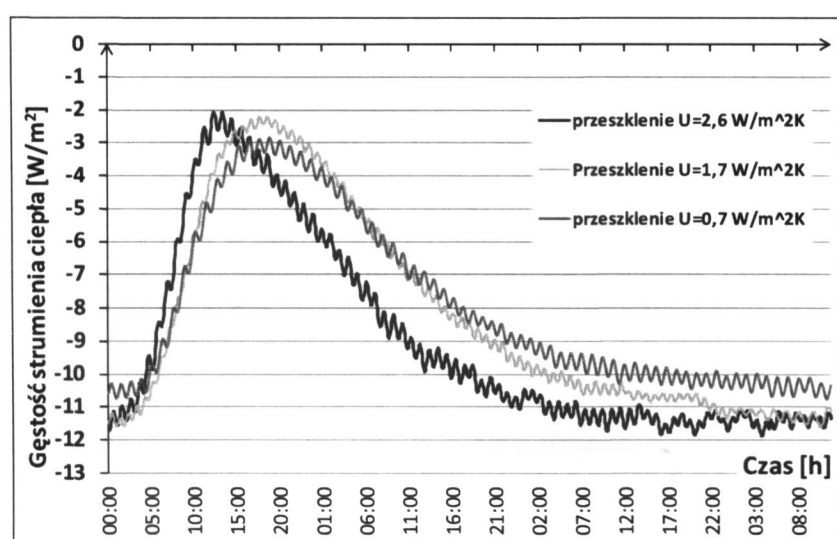
W analizowanej przegrodzie kolektorowo–akumulacyjnej rejestrowano temperatury (T_j) w charakterystycznych punktach pionowego przekroju poprzecznego oraz gęstości strumienia ciepła (q) na jej wewnętrznej powierzchni. Rozkłady temperatur w przegrodzie z trzema rodzajami przeszklenia dla czterech przedziałów pomiarowych: a – stan wyjściowy, b – stan po 6 godzinach, c – stan po 12 godzinach i d – stan po 24 godzinach, zostały przedstawione na rys.4. Przegroda P1 z przeszkleniem $U_{g1}=2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ osiągnęła najwyższą temperaturę absorbera po zakończeniu okresu nagrzewania $T_{b1}=46,7^\circ\text{C}$, podczas gdy przegroda P2 z przeszkleniem $U_{g2}=1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ temperaturę $T_{b2}=42,5^\circ\text{C}$ a kolejna P3 z przeszkleniem $U_{g3}=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ temperaturę $T_{b3}=33,2^\circ\text{C}$. Przegroda P1 najwyższą temperaturę absorbera uzyskuje dzięki najwyższej transmisyjności przeszklenia ($g_1=0,83\%$) co związane jest również z najwyższą wartością energii jaka jest dostarczona do absorbera. Przejście fali termicznej przez przegrodę w ciągu 24 godzin charakteryzuje wysoka dynamika zmiany temperatury w każdym z charakterystycznych przekrojów dla wszystkich przegród. Najwyższą dynamikę zmiany temperatur w charakterystycznych przekrojach obserwujemy w przegrodzie P1, najniższą dynamiką zaś charakteryzuje się przegroda P3 posiadająca przeszklenie o najwyższej izolacyjności.



Rys. 4. Rozkład temperatur w przegrodach z różnymi przeszkleniami. Warstwy przegrody: I – przeszklenie, II – pustka powietrzna, III – PCM, IV – pustak ceramiczny. Linie rozkładu temperatur: a, b, c, d – opis w tekście

Fig. 4. Distribution of temperatures in barriers with different glazing. Layers of barrier: I - glazing, II - air gap, III - PCM, IV - ceramic hollow. Temperature distribution lines: a, b, c, d - description in the text

Po upływie 12 godzin odnotowano najwyższe temperatury wewnątrz przegrody (w 1/3 i 2/3 grubości elementu ceramicznego) w każdej z nich. Wyjątek stanowi przegroda P3 w której najwyższą temperaturę w 2/3 grubości odnotowano po upływie 24 godzin. Najwyższą temperaturę na wewnętrznej powierzchni ściany po upływie 24 godzin odnotowano dla przegrody P3. Przegrody P2 i P3 po upływie 24 godzin na wewnętrznej powierzchni ściany posiadają wyższe temperatury niż przegroda P1, co oznacza ich niższe straty ciepła w porównaniu z P1. Przegroda P3 posiadająca przeszklenie o najwyższej izolacyjności, najwolniej nagrzewa się, posiada najdłuższy czas przechodzenia fali termicznej, co przekłada się na najwyższą efektywność cieplną (największą redukcję strat ciepła).



Rys. 5. Rozkład gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni ściany
Fig. 5. Density distribution of heat flux on the inner surface of the wall

Rozkład gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni ściany dla trzech kolejnych przeszkleń przedstawiono na rys.5. Przegroda z przeszkleniem P1 najszybciej osiąga maksymalną wartość gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni po ok. 13 godzinach, $q_1 = -2,0 \text{ W/m}^2$ z dynamiką maksymalnego przyrostu strumienia $\Delta q_1 = 9,5 \text{ W/m}^2$ oraz dobowym przyrostem strumienia $\Delta q_{1, \text{doba}} = 5,9 \text{ W/m}^2$. Kolejne przegrody w tym samym przekroju uzyskują niższe wartości gęstości strumienia ciepła w dłuższych okresach czasowych: przegroda P2 $q_2 = -2,2 \text{ W/m}^2$ po ok. 18 godzinach z dynamiką maksymalnego przyrostu strumienia $\Delta q_2 = 9,3 \text{ W/m}^2$ oraz dobowym przyrostem strumienia $\Delta q_{2, \text{doba}} = 8,1 \text{ W/m}^2$ a przegroda P3 $q_3 = -2,9 \text{ W/m}^2$ po ok. 18 godzinach z dynamiką maksymalnego przyrostu strumienia $\Delta q_3 = 7,6 \text{ W/m}^2$ oraz dobowym przyrostem strumienia $\Delta q_{3, \text{doba}} = 6,7 \text{ W/m}^2$. Przeszklenie o niskiej izolacyjności w przegrodzie P1 powoduje dość szybkie jej wychładzanie (najniżej położona linia na wykresie).

Po 24 godzinach od nagrzewania, gęstość strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni ściany kształtują się

następująco: $q_2 = -3,3 \text{ W/m}^2$, $q_3 = -3,8 \text{ W/m}^2$ i $q_1 = -5,6 \text{ W/m}^2$. Uzyskane wartości wskazują na najszybsze wychładzanie przegrody P1. W kolejnej, drugiej dobie proces chłodzenia pogłębia się aby po 48 godzinach uzyskać następujące wartości gęstości strumienia ciepła: $q_3 = -9,0 \text{ W/m}^2$, $q_2 = -9,7 \text{ W/m}^2$ i $q_1 = -10,8 \text{ W/m}^2$. W kolejnej, trzeciej dobie proces chłodzenia znacznie słabnie przechodząc w okres stabilizacji aby po 72 godzinach uzyskać następujące wartości gęstości strumienia ciepła: $q_3 = -10,3 \text{ W/m}^2$, $q_2 = -11,2 \text{ W/m}^2$ i $q_1 = -11,5 \text{ W/m}^2$. W kolejnych 8 godzinach obserwujemy praktycznie stabilizację gęstości strumienia ciepła z minimalną tendencją spadkową dla przegrody P2 i P3.

Po 80 godzinach uzyskano następujące wartości gęstości strumienia ciepła: $q_3 = -10,5 \text{ W/m}^2$, $q_2 = -11,4 \text{ W/m}^2$ i $q_1 = -11,5 \text{ W/m}^2$, wracając zarazem do stanu wyjściowego (przed rozpoczęciem badania).

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy wyników można stwierdzić, że dwa podstawowe parametry przeszklenia: izolacyjność cieplna i przepuszczalności energii promieniowania słonecznego są bardzo istotne w funkcjonowaniu przegrody kolektorowo – akumulacyjnej modyfikowanej materiałem zmienno – fazowym. Istnieje możliwość znacznego zmniejszenia strat ciepła przez przegrodę, jeżeli oba te parametry (U_g i g) zostaną optymalnie dobrane.

Badania zostały wykonane dla jednego cyklu nagrzewania, (jeden dzień słoneczny), po którym następuje kilka dni wychładzania przegrody (dni pochmurne). Z przeprowadzonych badań wynika, że po dwóch kolejnych dniach pochmurnych przegrody rozpoczynająby pracę praktycznie od początku (powracały do stanu wyjściowego). Uzyskane wyniki wskazują, że badane przegrody uzyskująby dodatni strumień ciepła (płynący do wnętrza pomieszczenia) po co najmniej dwóch kolejnych cyklach nagrzewania.

Uzyskane wyniki sugerują również, że najefektywniejsze przeszklenie może posiadać przegroda P2.

Należy zaznaczyć, że w badaniach zastosowano przeszklenie o najwyższej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego dla danej izolacyjności cieplnej.

Aby uzyskać szerszą udokumentowaną wiedzę w zakresie funkcjonowania przegrody kolektorowo – akumulacyjnej modyfikowanej materiałem zmienno – fazowym w różnych cyklach nagrzewania i chłodzenia istnieje potrzeba przeprowadzenia dalszych długoterminowych badań. Badania w tym zakresie będą kontynuowane, również przy zmiennych parametrach materiału ściennego modyfikowanego PCM, przeszklenia oraz temperatury w komorze zimnej pod kątem określenia ich wpływu na efektywność cieplną przegrody.

INFLUENCE OF CONFIGURATION SOLUTIONS OF GLAZING LAYER FOR ENERGETIC FUNCTIONING OF MODIFIED THERMAL STORAGE WALL

Summary: During designing and construction of the buildings, important matters are energy-saving issues related to the operational functioning of these buildings. The favorable energy characteristics of buildings can be achieved through various methods, based on the scientific issues of building physics. The future direction is the use of renewable energy sources to improve the heat balance of buildings with functional uses. Among the various technological solutions of external walls, the thermal storage wall is an interesting proposition of the southern, facade structures of buildings. The purpose of the considerations presented in this article is to determine the effect of glazing parameters on the thermal performance of the thermal storage wall containing phase change material. Glazing with different values of heat transfer coefficients and total transmittance of sunlight were used in the study. The graphical interpretation of the obtained results of studies of the behavior of the thermal storage wall modified by phase change material and by three types of glazing was presented. Based on the results of the research, conclusions were presented concerning the purpose of applying specific structural and material solutions of building envelopes in the climatic conditions of Poland.

Keywords: glazing, thermal storage wall, phase change material, experimental research

Literatura

- [1] Wieprzkowicz A., Heim D.: Współczynnik tłumienia amplitudy wahań temperatury izolacji termicznej modyfikowanej materiałem fazowo zmiennym. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, t. XXXIV, z. 64 (2/II/17), kwiecień-czerwiec 2017, s. 17-24
- [2] Chwieduk D. A.: Wybrane przykłady zastosowania materiałów PCM w budownictwie. *Czasopismo Inżynierii*

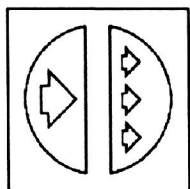
Lądowej, Środowiska i Architektury – *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 29-38

[3] Sun D., Wang L.: Research on heat transfer performance of passive solar collector-storage wall system with phase change materials, *Energy and Buildings* 119 (2016) 183–188

[4] Chwieduk D., A.: Dynamics of external wall structures with a PCM (phase change materials) in high latitude countries, *Energy* Volume 59, 15 September 2013, Pages 301–313

[5] Álvarez S., Cabeza L., F, Ruiz-Pardo A., Castell A., José Antonio Tenorio J., A.: Building integration of PCM for natural cooling of buildings, *Applied Energy* Volume 109, September 2013, Pages 514–522

[6] Lichołai L., Krasoń J., Miąsik P., Starakiewicz A.: Udział materiału zmiennie – fazowego w pracy energetycznej przegrody kolektorowo – akumulacyjnej w przejściowych warunkach klimatycznych, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, t. XXXIV, z. 64 (1/17), styczeń-marzec 2017, s. 495-504



ANALIZA NUMERYCZNA INTERAKCJI OPŁYWU POMIĘDZY GRUPAMI BUDYNKÓW O RÓŻNYCH WYSOKOŚCIACH

Janusz PIECHNA*, Sylwester TUDRUJ, Konrad KAMIENIECKI, Robert JÓŹWIAK

*Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej
Warszawa ul. Nowowiejska 24, e-mail: jpie@meil.pw.edu.pl*

Streszczenie: Praktycznie powstająca zabudowa jest często przypadkową mieszaniną budynków o różnych wysokościach. W pracy przedstawiono wyniki symulacji opływu rzeczywistej konfiguracji budynków dużych i małych tworzących skomplikowaną strukturę przepływu zależną od kierunku wiatru. Wykorzystując różne techniki wizualizacji starano się przedstawić cechy przepływu wyjaśniające stosunkowo niewielki wpływ zabudowy małych budynków na straty strumienia energii wiatru i zrozumieć mechanizmy przepływu je powodujące.

Słowa kluczowe: symulacje CFD, interakcja przepływu, mieszana zabudowa

1. WPROWADZENIE

Interakcja przepływu pomiędzy budynkami jest jednym z najbardziej interesujących problemów aerodynamiki budowli. Problem ten jest zwykle analizowany dla regularnego rozkładu rozważanych konfiguracji budynków. Przegląd literatury związanej z tym problemem można znaleźć w [1]. Numeryczne badania tych zjawisk zapoczątkowały prace [2]. Pierwsze analizy opływu wysokich budynków przedstawiono w pracy [3]. Analizę wpływu modeli turbulencji można znaleźć w [4].

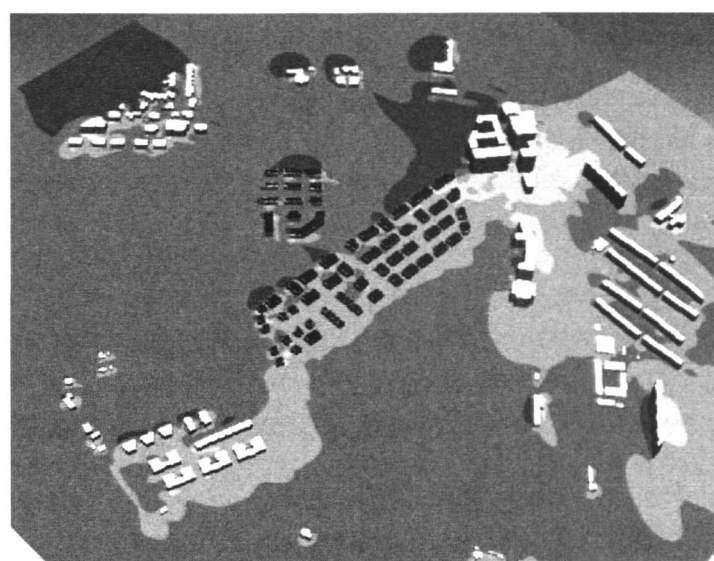
W dobie rozwoju prywatnego budownictwa pojawiają się sytuacje w których poszczególne inwestycje nie są wpisywane w bardziej ogólny plan zabudowy. Nie dobiera się wysokości i położenia budynków, tak by zachować jakieś sensowne warunki opływu całości i przepływów pomiędzy budynkami [5]. Pojawiają się konfiguracje, w których grupy budynków niskich bezpośrednio sąsiadują z budynkami wysokimi (rys.1, rys. 2).

W ramach prac związanych z oceną komfortu wiatrowego nowo budowanego osiedla wykonano symulacje numeryczne opływu budynków osiedla i jego otoczenia.

Analizowany układ budynków zawiera grupy budynków niskich i wysokich. Zauważono istotne różnice w wartościach względnych zmian strat strumienia energii wiatru w zależności od kierunku wiatru. Podjęto próbę wyjaśnienia fizycznych podstaw tego zjawiska. Przy pomocy symulacji starano się znaleźć odpowiedzi na pytania jakie są mechanizmy współoddziaływania przepływów pomiędzy budynkami. Przy wykorzystaniu różnych technik wizualizacji wyników obliczeń numerycznych starano się zidentyfikować strefy przepływu odpowiedzialne za wzrost lub obniżenie oporów aerodynamicznych analizowanej zabudowy.

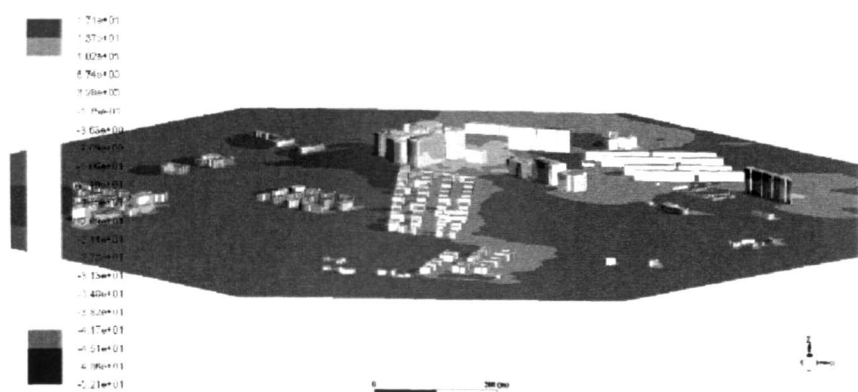
2. GEOMETRIA BUDYNKÓW

Na rys.1 przedstawiono analizowany obszar w widoku z góry dla uwidocznienia wzajemnego położenia budynków osiedla. Na rys. 2 pokazano wygląd osiedla w perspektywie, dla ukazania i podkreślenia różnic wysokości budynków występujących w zabudowie



Rys. 1. Rozmieszczenie budynków w analizowanym obszarze.
Fig. 1. Distribution of buildings in analysed area.

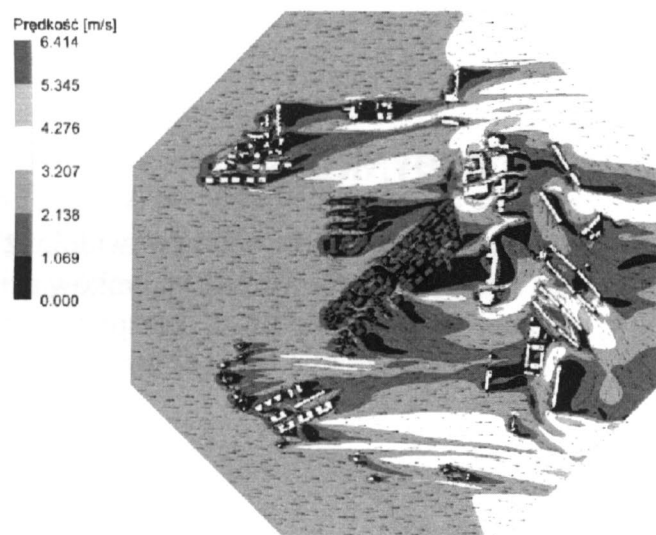
*Autor korespondencyjny, e-mail: jpie@meil.pw.edu.pl



Rys. 2. Widok budynków w perspektywie.
Fig. 2. Perspective view of the buildings

3. METODYKA OBLICZEŃ

Do wykonania obliczeń użyto komercyjnego pakietu ANSYS-Fluent. Wykorzystuje on metodę objętości skończonych do rozwiązywania równań Naviera-Stokesa w obszarach o złożonej geometrii umożliwiając obliczenia przepływów turbulentnych. Przyjęto w tym przypadku, iż obszar obliczeniowy ma formę bryły o ośmiokątnej podstawie. Widok obszaru obliczeniowego w ujęciu z góry pokazano na rys. 3. Obszar obliczeniowy miał maksymalną szerokość 1500 m i wysokość 225 m wynikającą z maksymalnej wysokości budynków w tym obszarze. Zawierał około 11.5 mln głównie sześciennych komórek obliczeniowych, rozłożonych w sposób nierównomierny.



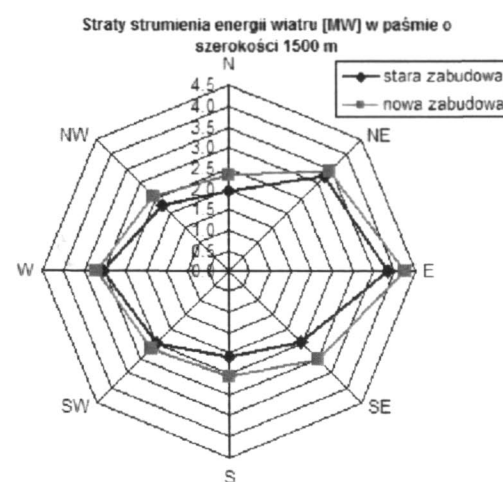
Rys. 3. Kształt obszaru obliczeniowego.
Fig. 3. The shape of computational domain.

W omawianej pracy zastosowano model płynu nieściśliwego, lepkiego, z wykorzystaniem modelu turbulencji Spalarta-Almarasa. Model ten został wybrany z powodu występowania w analizowanym przepływie dobrze określonych linii oderwania przepływu i silnych struktur wirowych. Model ten, ma w swojej strukturze, zaimplementowane dwa użyteczne w tym przypadku mechanizmy. Jeden uwzględniający wpływ odległości środka komórek granicznych od ścianek, na obliczany poziom lepkości turbulentnej i drugi, redukujący produkcję

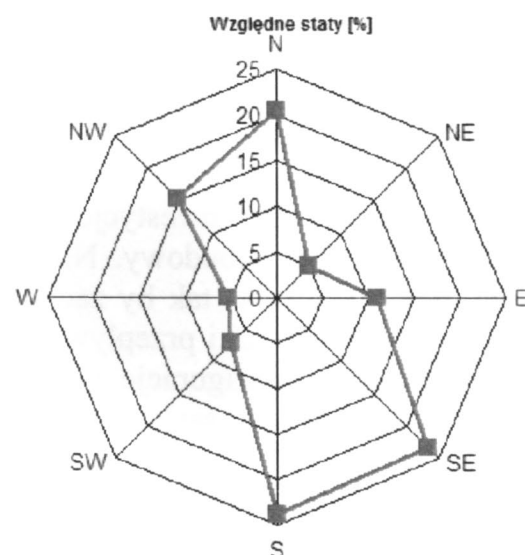
turbulencji w rdzeniach struktur wirowych. Na wlotowych granicach obszaru obliczeniowego przyjmowano zarówno rozkład prędkości wiatru jak i poziomy turbulencji zgodne z występującymi w warstwie przyziemnej. Na bokach równoległych do kierunku wiatru przyjmowano warunki symetrii, a na wylocie z obszaru obliczeniowego stałą wartość ciśnienia. Straty energii wiatru obliczano w oparciu o obliczone siły normalne i styczne działające na podłoże i ściany budynków.

4. WYNIKI OBLICZEŃ STRAT ENERGII WIATRU

Wykonano obliczenia oporów aerodynamicznych budynków w dwóch konfiguracjach. Jako układ odniesienia przyjęto geometrię bez budynków w środku obszaru (brak budynków wyróżnionych kolorem fioletowym na rys. 3). Wykonano kolejne obliczenia dla pełnego zestawu budynków pokazanego na rys. 1, rys. 2, rys. 3. Obliczono straty energii strumienia wiatru. Na rys. 4 pokazano bezwzględne wartości strat, a na rys. 5 względne straty spowodowane obecnością grupy małych budynków w środku analizowanego obszaru.



Rys. 4. Bezwzględne straty energii wiatru.
Fig. 4. Total wind energy losses.



Rys. 5. Względne straty energii wiatru.
Fig. 5. Relative wind energy losses.

Rozważając zmiany względnych strat energii wiatru i porównując je z układem budynków i kierunkiem wiatru, można zauważyć małe wartości tych strat w sytuacji gdy małe budynki znajdują się w osi wiatru przed lub za budynkami wysokimi. Podjęto próbę wyjaśnienia fizycznych podstaw tego zjawiska.

5. WIZUALIZACJE WYNIKÓW OBLICZEŃ

Wydaje się iż przyczyną redukcji strat energii wiatru jest skomplikowana interakcja przepływu pomiędzy budynkami. Interakcje takie można analizować przez wizualizację niektórych parametrów przepływu. Interesujący jest problem związany z oddziaływaniem opływu małych i dużych budynków na budynki w sąsiedztwie. Analizując straty strumienia energii wiatru dla poszczególnych kierunków działania wiatru można zauważyć iż w kilku kierunkach straty tej energii są małe. Dlaczego? Oczywiście wydaje się osłanianie lub zasłanianie budynków małych przez budynki duże. Sytuacja odwrotna nie jest już taka oczywista. By poszukać fizycznego uzasadnienia takiego stanu rzeczy skoncentrowano uwagę na trzech kierunkach wiatru: zachodnim, północno-wschodnim i południowo-zachodnim. Wykonano wizualizacje rozwiązań numerycznych dla ukazania zmian struktury przepływu spowodowanych pojawieniem się nowych niskich budynków osiedla.

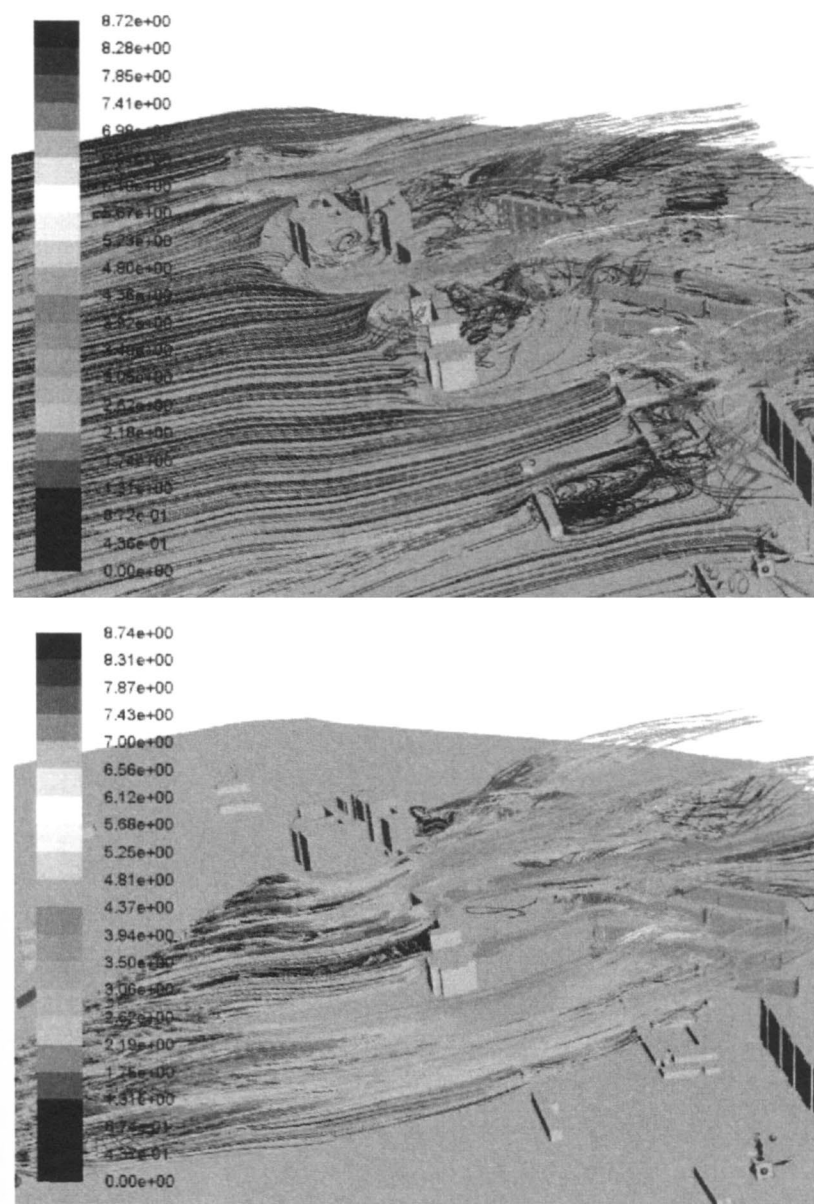
5.1. Kierunek wiatru zachodni W

Przy wietrze zachodnim niskie budynki mogą częściowo osłaniać budynki wysokie. Na rys. 6 pokazano przebiegi linii prądu rozpoczynających się w pobliżu ziemi w konfiguracji, w której przed dużymi budynkami nie ma zabudowy (konfiguracja referencyjna) oraz przebiegi linii prądu rozpoczynających się na niskich budynkach dobudowanych przed budynkami wysokimi.

Nowe budynki pomimo małej wysokości zmieniają strukturę opływu budynków wysokich, częściowo je osłaniając w ich dolnej części, co powoduje iż opory nowych budynków są częściowo kompensowane zmniejszeniem strat powodowanych przez budynki duże.

Na rys. 6 i rys.7 pokazano przebiegi linii prądu wskazujące na odchylenie przez budynki niskie przepływu do góry i zmniejszenie prędkości wiatru w dolnej części budynków wysokich. Na rys. 7 wyraźnie widoczne są dwu-poziomowe przebiegi linii prądu.

Potwierdzenie tego wniosku można znaleźć na rys. 8, gdzie pokazano kształt powierzchni stałej wartości prędkości przepływu. Analizując ten kształt, wyraźnie różny w dolnej części rysunku, można zauważyć przesunięcie obszaru wyższych prędkości przepływu powietrza wyżej. Oznacza to mniejsze prędkości napływu na budynki wysokie.



Rys. 6. Przebieg linii prądu wokół zabudowy istniejącej - układ referencyjny (górze) oraz przebiegi linii prądu rozpoczynających się na dobudowanych niskich budynkach przed istniejącą zabudową (dół).

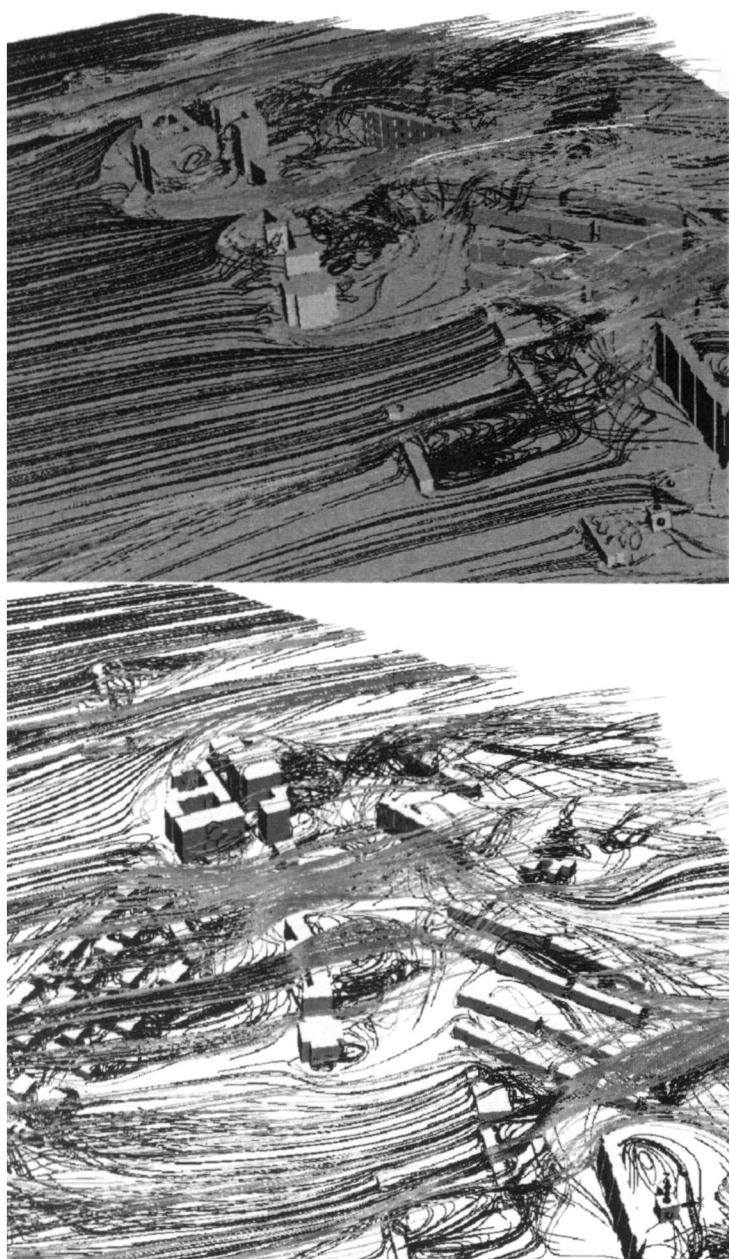
Fig. 6. Pathlines around the existing buildings - reference system (top) and pathlines starting from small buildings located in the front of the existing building (bottom).

5.2 Kierunek wiatru północno-wschodni NE

Przy wietrze północno-wschodnim budynki niskie osłaniają się przez budynki wysokie. W tym przypadku efekt ukrywania małych budynków w cieniu aerodynamicznym budynków wysokich jest niekwestionowany. Dla zilustrowania tego zjawiska wykorzystano inną technikę wizualizacji.

Na rys. 9 pokazano rozkłady prędkości przepływu na wysokości 1.75 metra nad ziemią wraz z przebiegiem linii prądu. Na górnej części rysunku można zauważyć duży obszar niskich prędkości przepływu za budynkami wysokimi (cień aerodynamiczny), w którym (dolna część rysunku) znajduje się większość z niskich budynków.

Na rys. 10 pokazano porównanie przebiegów linii prądu w bliskim obszarze sąsiedztwa zabudowy niskiej i wysokiej, wskazujące na przepływ powietrza nad niską zabudową.



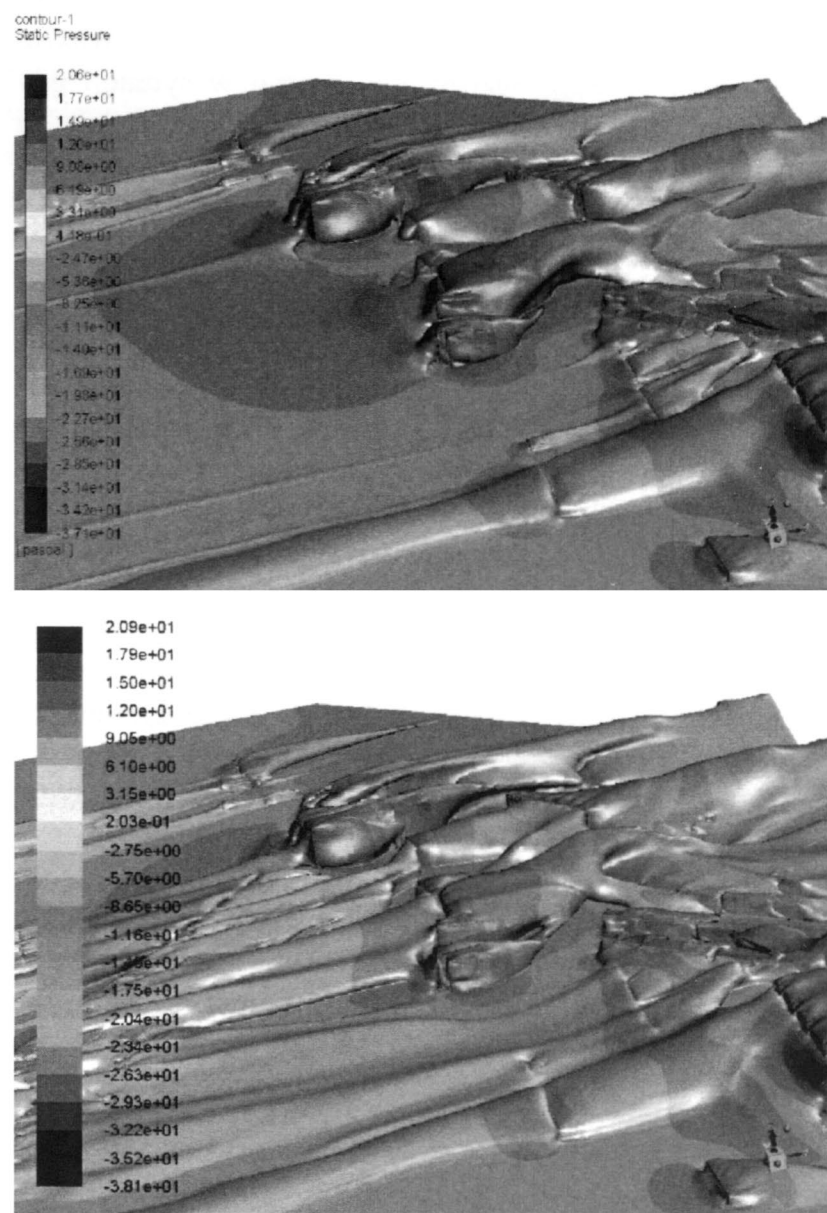
Rys. 7. Przebieg linii prądu wokół zabudowy istniejącej - układ referencyjny (góra) oraz przebiegi linii prądu dla pełnej zabudowy (dół).
Fig. 7. Pathlines around the existing buildings - reference system (top) and pathlines around actually existing building (bottom).

5.3 Kierunek wiatru południowo-zachodni SW

Przy wietrze południowo-zachodnim interakcja przepływu pomiędzy budynkami nie jest tak jednoznaczna. Duża grupa niskich budynków ulokowana jest pod wiatr w stosunku do budynków wysokich. Czy niskie budynki rzeczywiście częściowo osłaniają budynki wysokie?

Na rys. 11 przedstawiono przebiegi linii prądu w okolicy bezpośredniego sąsiedztwa budynków niskich i wysokich. Widoczne jest przeniesienie struktury przepływu niezaburzonego wyżej.

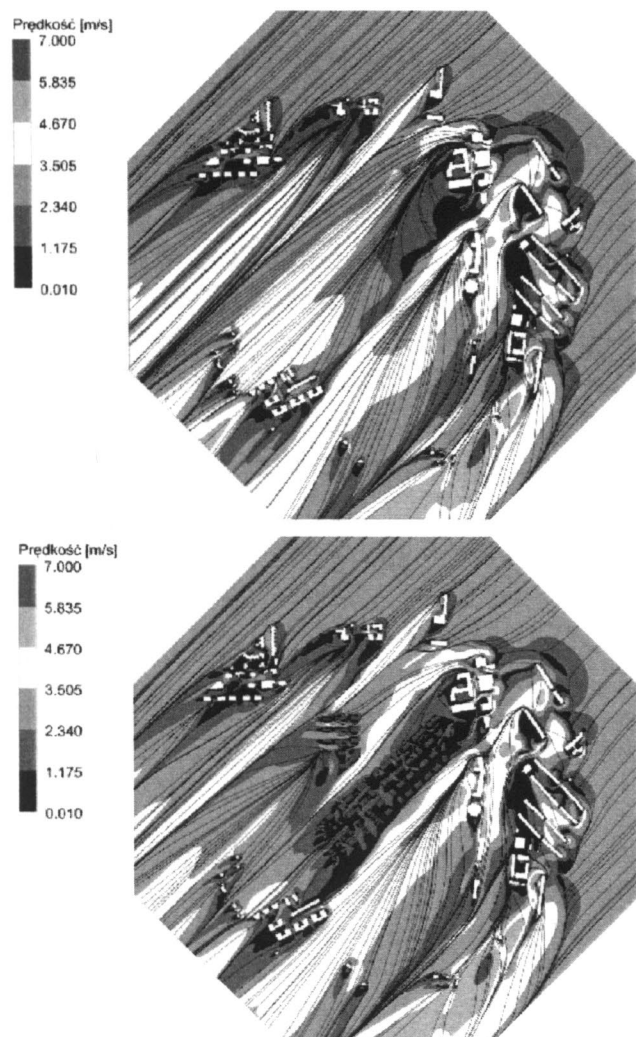
Można zauważyć linie prądu przebiegające nisko nad ziemią, gdy brak jest niskich budynków (górny rysunek) i przebiegające na większej wysokości, mające bardziej skomplikowany przebieg nad niskimi budynkami (dolny rysunek), co sugeruje częściowe osłanianie wysokich budynków.



Rys. 8. Porównanie rozkładów ciśnienia na powierzchniach stałej wartości prędkości przepływu równej 2.5 m/s (geometria referencyjna - góra) i wpływ niskiej zabudowy (dół).
Fig. 8. Comparison of pressure distributions on surfaces of constant flow velocity of 2.5 m / s for reference geometry (top) and for new geometry (bottom).

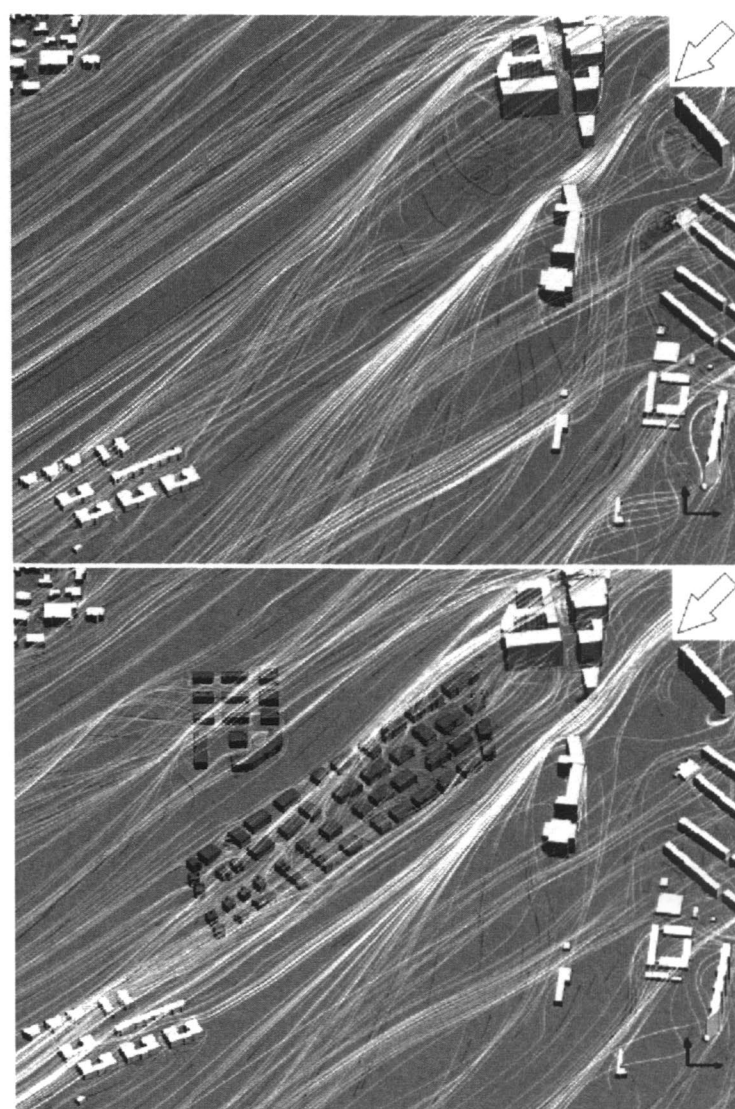
Na rys. 12 pokazano kształt powierzchni stałej wartości prędkości przepływu równej 1 m/s oraz rozkłady ciśnienia na niej i na powierzchniach budynków. Wyraźnie widoczna jest zmiana kształtu tej powierzchni spowodowana obecnością małych budynków. Można zauważyć obniżone wartości ciśnienia na ścianach osłanianych wysokich budynków i praktycznie brak zmian prędkości w ich pobliżu.

Na rys. 13 pokazano jeszcze raz kształt powierzchni stałej prędkości przepływu, ale o wyższej wartości równej 2.5 m/s. Można zauważyć istotne przesunięcie obszaru wyższych prędkości przepływu wyżej w pobliżu wysokich budynków, co należy interpretować jako występowanie efektu osłaniania wysokich budynków przez niskie. Widoczne są też rozkłady ciśnienia na budynkach i powierzchni reprezentującej stałą wartość prędkości przepływu równa 2.5 m/s.



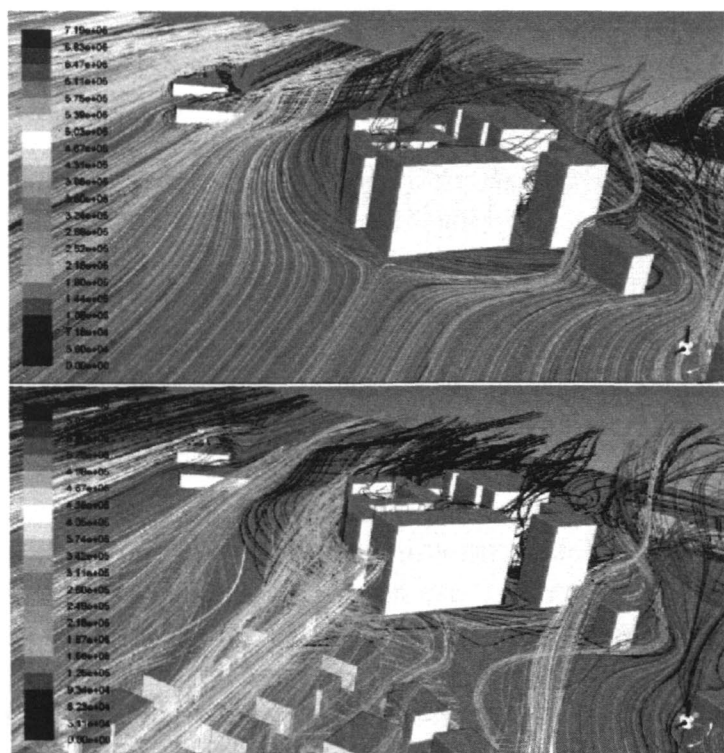
Rys. 9. Przebieg linii prądu w pobliżu ziemi i wartości prędkości na poziomie 1.75 m nad ziemią zabudowa stara (góra), zabudowa nowa (dół), wiatr NE.

Fig. 9. Pathlines and air velocity values on the level of 1.75 m above the ground - old buildings (top), new buildings (bottom), NE wind.



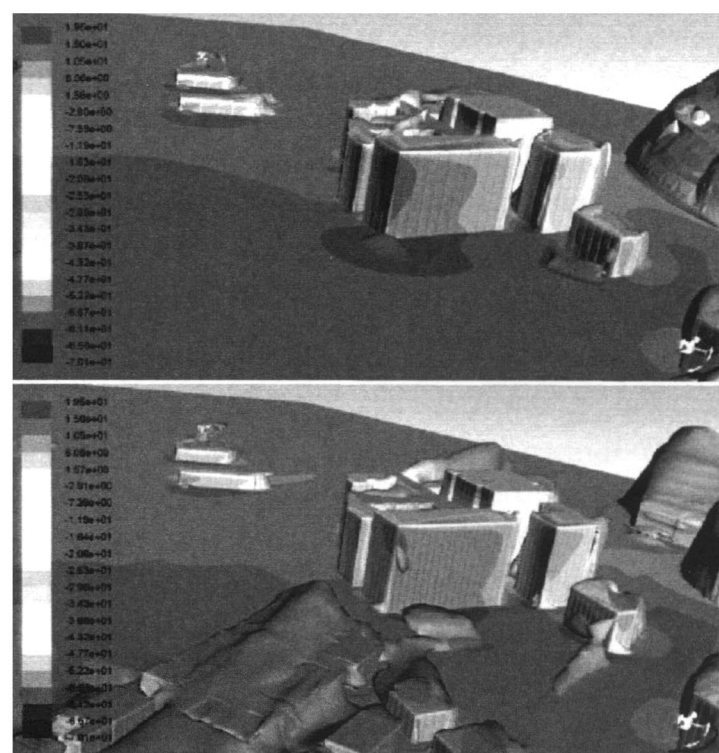
Rys. 10. Przebieg linii prądu w pobliżu ziemi - zabudowa stara (góra), zabudowa nowa (dół), wiatr NE.

Fig. 10. Pathlines - old buildings (top), new buildings (bottom), NE wind.



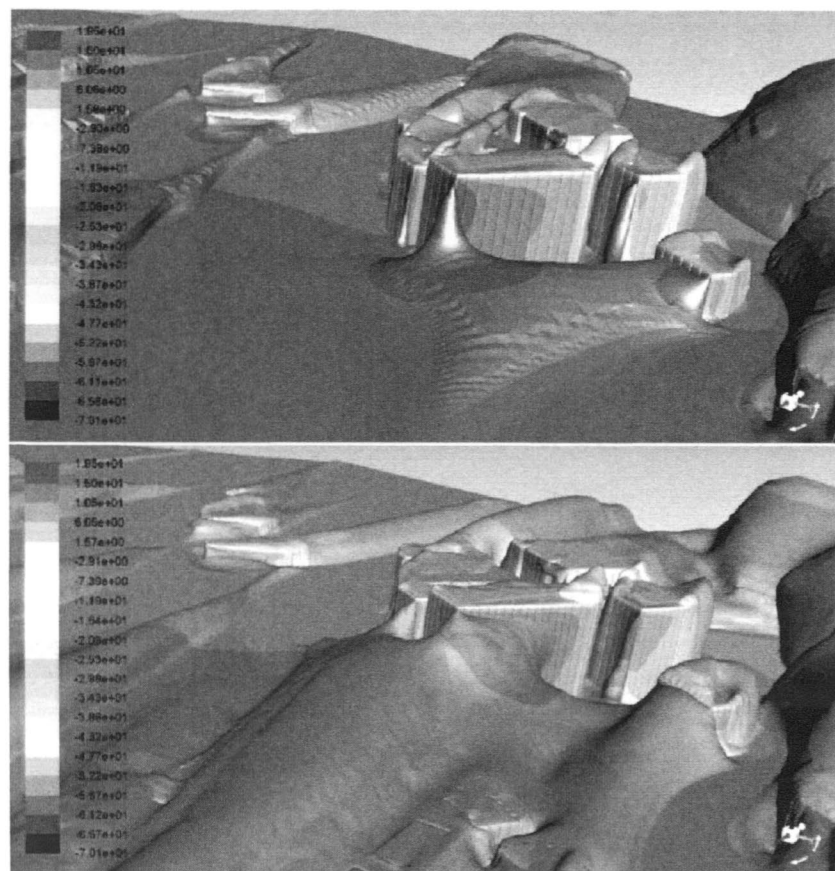
Rys. 11. Przebieg linii prądu - zabudowa stara (góra), zabudowa nowa (dół), wiatr SW

Fig. 11. Pathlines - old buildings (top), a new buildings (bottom), SW wind



Rys. 12. Zmiany powierzchni stałej wartości prędkości przepływu równej 1 m/s i rozkłady ciśnień - zabudowa stara (góra), zabudowa nowa (dół), wiatr SW.

Fig. 12. Comparison of pressure distributions on surfaces of constant flow velocity of 1 m/s, reference geometry (top) and final geometry (bottom).



Rys. 13. Zmiany powierzchni stałej wartości prędkości przepływu równej 2.5 m/s i rozkłady ciśnień - zabudowa stara (góra), zabudowa nowa (dół), wiatr SW.

Fig. 13. Comparison of pressure distributions on surfaces of constant flow velocity of 2.5 m / s, reference geometry (top) and final geometry (bottom), SW wind.

6. WNIOSKI

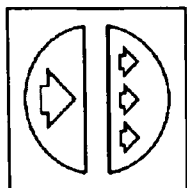
Konfiguracje budynków w rzeczywistej zabudowie odbiegają od idealnej, preferowanej przez inżynierów zajmujących się oddziaływaniem wiatru. Takie konfiguracje mogą prowadzić do nieco zaskakujących zmian struktury przepływu i nieoczekiwanego wpływu na straty strumienia energii wiatru. Przy pomocy symulacji numerycznych z wykorzystaniem różnych technik wizualizacji przepływu można uzyskać zarówno informacje ilościowe jak i jakościowe pozwalające na wyrobienie wśród architektów umiejętności przewidywania konsekwencji ich działań budowlanych.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE FLOW INTERACTION BETWEEN GROUP OF BUILDINGS OF DIFFERENT HEIGHTS

Summary: Existing buildings configuration is often a random mix of buildings of different heights. The paper presents the simulation results of the flow between tall and low buildings, that form a complex flow structure dependent on the direction of the wind. Utilizing various visualization techniques, the authors try to explain the physical reasons of relatively small impact of low buildings on wind energy losses in such configuration.

Literatura

- [1] Blocken B, Carmeliet J. *Pedestrian wind environment around buildings: Literature review and practical examples*. Journal of Thermal Envelope and Building Science 28(2): (2004.)107-159.
- [2] Bottema, M., Leene, J.A. and Wisse, J.A. *Towards forecasting of wind comfort*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44: (1992). 2365-2376.
- [3] Takakura, S., Suyama, Y. and Aoyama, M. *Numerical simulation of flowfield around buildings in an urban area*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46&47: . (1993). 765-771.
- [4] Lübcke, H., Schmidt, St., Rung, T. and Thiele, F. *Comparison of LES and RANS in bluff-body flows*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89: (2001). 1471-1485.
- [5] Lawson, T., *Building aerodynamics*. London: Imperial College Press. 286 p. 2001.



EMISJA LOTNYCH ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH Z URZĄDZEŃ BIUROWYCH – AKTUALNY STAN WIEDZY ORAZ PLAN BADAŃ

Małgorzata SZYMKOWIAK^{1*}, Dariusz HEIM¹, Jerzy SOWA²

¹*Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Środowiska*

ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, e-mail: 800862@edu.p.lodz.pl, dariusz.heim@p.lodz.pl

²*Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska*
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, e-mail: jerzy.sowa@is.pw.edu.pl

Streszczenie: W pracy dokonano przeglądu aktualnego stanu wiedzy na temat źródeł emisji lotnych związków organicznych w pomieszczeniach biurowych. Omówiono wyniki badań przeprowadzonych w Stanach Zjednoczonych, Iranie oraz na Tajwanie. Autorzy wykonali także badania zawartości lotnych związków organicznych w pomieszczeniu biurowym budynku Politechniki Łódzkiej. Badania wykonano po okresie intensywnej pracy dwóch zestawów komputerowych w pomieszczeniu o kubaturze 33,8 m³ i obniżonej wentylacji. Na podstawie analizy z wykorzystaniem techniki chromatografii gazowej zidentyfikowano 4 substancje z grupy lotnych związków organicznych – LZO. Dokonano wstępnej oceny możliwego wpływu zidentyfikowanych związków na zdrowie i samopoczucie użytkowników. W ostatniej części pracy przeanalizowano dotychczasowe doświadczenia w stosowaniu wypraw malarskich z ditlenkiem tytanu do utylizacji zanieczyszczeń powietrza oraz bardziej szczegółowo omówiono planowany eksperyment polegający na wykorzystaniu zjawiska fotokatalitycznego utleniania do rozkładu LZO.

Słowa kluczowe: chromatografia gazowa, formaldehyd, etylobenzen, ftalan dibutyli, fotokataliza

1. WPROWADZENIE

Problematyka zanieczyszczenia powietrza, a tym samym jakości powietrza wewnętrznego w miejscach pracy, w tym pracy biurowej jest zagadnieniem niezwykle aktualnym w kontekście ciągłego dążenia do poprawy charakterystyki energetycznej budynków. Jest ono powiązane bezpośrednio ze skutecznością działania systemów wentylacji, na co uwagę zwracali autorzy wielu prac. Sowa [1] podkreśla, że „Podczas projektowania systemów przyjmuje się często minimalną intensywność wentylacji pozwalającą spełnić wymagania prawne”. Również sposób przygotowania, doprowadzenia i usuwania powietrza z pomieszczeń ma niezwykle istotny wpływ na występowanie i poziom stężenia

zanieczyszczeń, których źródłem mogą być zarówno czynniki zewnętrzne, jak i wewnętrzne. W celu usunięcia zanieczyszczeń z pomieszczenia najprostszym sposobem jest zapewnienie odpowiedniego strumienia powietrza wentylacyjnego. Jednak z uwagi na oszczędność energii (ciepła i energii pomocniczej) systemy wentylacji włączane są okresowo na przykład jedynie na czas obecności użytkowników. Okres ten zazwyczaj pokrywa się z czasem, gdy w budynku następuje podwyższona emisja zanieczyszczeń, choć w wielu przypadkach urządzenia będące ich źródłem pracują w cyklu 24 godzinny, np. stacje robocze. Może to skutkować okresowym wzrostem stężenia zanieczyszczeń, lecz przede wszystkim ich adsorpcją [2] na elementach wyposażenia pomieszczeń i wystroju wnętrz w okresie poza czasem użytkowania. Natomiast wzrost strumienia powietrza wentylacyjnego, który następuje najczęściej w momencie pojawienia się użytkowników powodować będzie z kolei desorpcję szkodliwych związków do powietrza wewnętrznego. Opisany problem wydaje się być na tyle znaczący, iż istotnym wydaje się podjęcie badań w obszarze oceny skuteczności innych, wybranych metod eliminacji zanieczyszczeń w pomieszczeniach biurowych.

Celem niniejszej pracy jest podsumowanie stanu wiedzy w przedmiotowym temacie. Ponadto autorzy dokonali analizy występowania różnych lotnych związków organicznych (LZO) w powietrzu wewnętrznym pomieszczenia biurowego wraz ze wstępną oceną wpływu występujących związków na zdrowie i samopoczucie użytkowników. Zaproponowano także sposób badania skuteczności techniki fotokatalizy wspomaganą lampami UV w kontekście neutralizacji LZO w okresie nocnym oraz projekt stanowiska badawczego.

*Autor korespondencyjny, e-mail: 800862@edu.p.lodz.pl

2. WYNIKI BADAŃ PROWADZONYCH W WYBRANYCH KRAJACH

2.1. Emisja LZO z urządzeń drukujących

Badania przeprowadzone w Stanach Zjednoczonych przez Stefaniaka i współautorów [3] polegały na ocenie narażenia na ekspozycję lotnych związków organicznych pracowników trzech punktów ksero. Wykryte zostały 54 różne lotne związki organiczne występujące w powietrzu wewnętrznym w pobliżu kserokopiar. Różnorodność wykrytych związków wiąże się przede wszystkim z właściwościami kserokopiarki: szybkością kopiowania, typem tonera, bębna lub wałka a także związana jest z eksploatacją kserokopiarki przez pracowników. Natomiast w obszarze oddychania pracowników wykryto 38 związków lotnych, których stężenie wynosiło od 0,1 ppb (1,1-bifenyl, p-dichlorobenzen, styren, tetrachloroetylen) do 689,6 ppb (toluen) [3].

W literaturze znaleźć można wiele wyników badań emisji zanieczyszczeń z różnego rodzaju sprzętu biurowego prowadzonych w komorach badawczych. Okazuje się, że największą emisję wykazują takie lotne związki organiczne jak: tolueń, etylobenzen, m(p)-ksylen oraz styren. Leovic i współpracownicy [4] opisali szczegółowe badania 4 modeli kopiarek. W przypadku trzech z nich występowały bardzo duże różnice w emisji LZO w zależności od trybu pracy kopiar (druk/oczekiwanie) (nawet o dwa rzędy wielkości). Warto jednak zauważyć, że w przypadku jednego z modeli emisja zanieczyszczeń była w przybliżeniu stała. Badania Lee i współautorów [5] pokazały, że całkowity sumaryczny poziom emisji lotnych związków organicznych mieści się w zakresie od 0,2 µg/stronę (drukarka atramentowa) do 7,0 µg/stronę (drukarka laserowa). Wykazano, że drukarki laserowe emitują wyższe stężenia lotnych związków organicznych, co związane jest z ich sposobem działania oraz użytym typem tonera.

W siedmiu wybranych typowych punktach ksero na Tajwanie zostały przeprowadzone badania na obecność i stężenie lotnych związków organicznych. Miały one na celu określenie stopnia narażenia pracowników na skutki zdrowotne spowodowane obecnością tych substancji w powietrzu wewnętrznym. Pomieszczenia punktów ksero miały kubaturę między 110 a 168 m³ i w każdym pracowało minimum 7 kserokopiar. Podczas pomiarów stwierdzono wysokie stężenia takich związków jak benzen, tolueń, etylobenzen, ksylen i styren. Pomiary potwierdziły wyniki badań kserokopiar w komorach, wykazujących, że tolueń, etylobenzen i ksylen są głównymi związkami przez nie emitowanymi. Jednakże średnie stężenia styrenu i benzenu były 18 i 138 razy większe niż stężenia w punktach ksero zmierzone w Stanach Zjednoczonych. Wysokie stężenia lotnych związków organicznych mogą przyczyniać się do pogorszenia stanu zdrowia pracowników i rozwoju u nich chorób nowotworowych [6]. Podobne badania zostały

przeprowadzone w terminie późniejszym w dwunastu punktach ksero na Tajwanie. W powietrzu wewnętrznym zaobserwowano występowanie LZO, takich jak benzen, tolueń, styren, etylobenzen, ksylen, acetofenon oraz alkany i aldehydy, które emitowane są przez tonery, utrwalacz oraz papier nagrzewany w kserokopiarce. Źródłem LZO w punktach ksero mogą być również drukowane dokumenty, rozpuszczalniki, wyposażenie biurowe, materiały budowlane i wykończeniowe oraz pozostały sprzęt biurowy [7].

Badania przeprowadzone przez Kagi i współautorów [8] miały na celu monitoring lotnych związków organicznych, ozonu i pyłu zawieszonego w powietrzu wewnętrznym pomieszczenia z zainstalowaną drukarką laserową oraz atramentową. Poszczególne drukarki były także badane w komorze testowej. Pomiary wykazały emisję styrenu, m(p)-ksylenu i o-ksylenu podczas procesu drukowania drukarką laserową oraz pentanolu przy drukowaniu drukarką atramentową. Źródłem styrenu jest toner, pentanol natomiast emitowany jest przez tusz. Z kolei źródłem ksylenu mogą być materiały z jakich wykonana jest sama drukarka. Ozon generowany przez drukarki nie powoduje narastania jego stężenia w powietrzu, gdyż posiada on zdolność utleniania LZO do innych substancji. Dlatego poza monitorowaniem LZO emitowanych przez urządzenia biurowe należy również monitorować stężenie możliwych produktów reakcji takich jak formaldehyd, kwas mrówkowy i aldehyd octowy.

Sarkhosh i inni [9] wykonali badania jakości powietrza wewnętrznego w czterech punktach ksero w Teheranie, Iran. Pomiary były przeprowadzone w sezonie wiosennym i zimowym. Podczas pracy kserokopiar stężenie lotnych związków organicznych w pomieszczeniu wzrastało. Wzrost był wyższy w sezonie zimowym niż wiosennym. W pobranych próbkach wykryto 19 różnych lotnych związków organicznych. Najwyższe stężenia posiadały benzen i tolueń. Kowalska i inni [10] opisali badania emisji lotnych chlorowcowanych związków organicznych w środowisku biurowym. Emisję zanieczyszczeń generowanych przez siedem wybranych urządzeń biurowych, takich jak drukarki, mierzono w komorze badawczej. Wykazano, że przetestowane urządzenia emitują substancje chemiczne szkodliwe dla zdrowia, w tym benzen i trichloroetylen. Związki te zostały zaklasyfikowane przez IARC do grupy związków rakotwórczych dla ludzi. Wśród emitowanych lotnych związków organicznych 2% stanowiły lotne chlorowcowe związki organiczne, takie jak chlorobenzen, 1,2-dichlorobenzen, 1,4-dichlorobenzen, tetrachloroetylen, 1,2,4-trichlorobenzen i trichloroetylen.

2.2. Emisja LZO z komputerów i monitorów

W ciągu ostatnich kilku lat prowadzone są badania nad oceną jakościową i ilościową emisji ze stanowisk komputerowych. Zgodnie z dotychczas przeprowadzonymi badaniami emisja lotnych związków organicznych związana jest z działaniem

sprzętu komputerowego, skanerów, kserokopiarek i drukarek. Zgodnie z badaniami Berriosa i współpracowników [11] dotyczących wyposażenia biurowego, w tym komputerów osobistych, okazało się, że poziom emisji lotnych związków organicznych był wyższy od 10 do 120 razy dla urządzeń pracujących niż będących w spoczynku. Ponadto symulacje wykazały, że praca drukarek, kserokopiarek i komputerów osobistych znacząco przyczynia się do emisji zanieczyszczeń LZO w typowym biurze. Wszystkie przebadane komputery osobiste emitowały związki takie jak m-i p-ksylen, pentadekan, fenol i toluen. Zestawy komputerowe składające się ze stacji dysków wraz z monitorem i klawiaturą zostały w komorach badawczych przebadane przez Yoon i współautorów [13]. Pomiar wykazały emisję z zestawów komputerowych do powietrza: toluenu, etylobenzenu, ksylenu, 1,3,5-trimetylobenzenu oraz 1,2,4-trimetylobenzenu. Badania wpływu sprzętu komputerowego na jakość powietrza przeprowadzone zostały w pomieszczeniu badawczym (laboratorium urządzone jak biuro) przez Bako-Biro i współpracowników [13]. Jednorazowo w pomieszczeniu przebywało 6 losowo wybieranych młodych kobiet (z grupy 30) które możliwie realistycznie symulowały pracę biurową. Zgodnie z planem eksperymentu niezależnie od komputerów używanych przez uczestniczki eksperymentu za ekranem czasami umieszczano także 6 dodatkowych PC. Po pewnym czasie następowała ocena jakości powietrza i odczuwalnej jakości przez osoby biorące udział w badaniu. Wyniki wykazały, że komputery osobiste mogą być silnym emitorem zanieczyszczeń powietrza (stwierdzono ok. 3,5 razy większą emisję zanieczyszczeń zapachowych z 1 komputera niż emisja pochodząca od standardowej osoby) i mogą wpływać na odczuwanie dolegliwości tzw. Syndromu Chorego Budynku.

Badania przeprowadzone przez JEITA (Japan Electronics and Information Technologies Industries Association) [14] w 2014 r. dotyczyły pomiarów emisji LZO przez komputery stacjonarne, laptopy oraz tablety. Pomiarów sprzętu dokonano w komorach badawczych. Okazało się, że najwyższe stężenia emisji wykazują komputery nowe. Natomiast po około 10 dniach emisja ustala się na niskim równym poziomie. Sprzęt komputerowy emitował: toluen, etylobenzen, ksylen, styren, formaldehyd oraz acetaldehyd. Następnie wykonano symulacje emisji dla klasy szkolnej, w której pracowałoby 40 zestawów komputerowych. Miały one za zadanie sprawdzić maksymalny poziom emisji tych sześciu substancji. Wyniki symulacji potwierdziły, że zestawy komputerowe mogą przyczyniać się do wzrostu stężenia lotnych związków organicznych w powietrzu wewnętrznym.

2.3. Podsumowanie przeglądu literatury

Lotne związki organiczne, takie jak: benzen, toluen, etylobenzen, ksylen, styren, a także formaldehyd zostały

zidentyfikowane w badaniach emisji z urządzeń drukujących. Wszystkie te związki należą do toksycznych zanieczyszczeń powietrza i mogą negatywnie wpływać na zdrowie ludzi. W związku z tym urządzenia biurowe powinny być traktowane jako źródło emisji szeregu potencjalnie szkodliwych substancji, głównie lotnych związków organicznych. LZO pochodzą głównie z tonerów poddawanych ogrzewaniu podczas procesu drukowania, a także pyłów z papieru. Oprócz emisji LZO z drukarek i kserokopiarek następuje również emisja z komputerów, która jest jednak niższa niż ze sprzętu drukującego.

3. BADANIA WŁASNE

3.1. Badania zawartości LZO w powietrzu

W związku z tym, iż lotne związki organiczne mogą być emitowane przez sprzęt wyposażenia biurowego zostały podjęte próby zidentyfikowania problemu ich występowania w wybranym pomieszczeniu biurowym. Pomieszczenie badawcze jest miejscem pracy dwóch osób, zaś jego wymiary wynoszą 4,12 m × 2,56 m × 3,20 m. Pomieszczenie posiada indywidualny system wentylacji zapewniający przepływ powietrza poprzez zamontowane w ścianie zewnętrznej kanałowe urządzenie wentylacji rewersyjnej, jak również przez nieszczelności w stolarcie okiennej i drzwiowej. Na potrzeby badania poziomu stężenia lotnych związków organicznych w tym pomieszczeniu system wentylacji został wyłączony. Przez okres nocy w pomieszczeniu pracowały dwa komputery stacjonarne.

Tabela 1. Wyniki pomiarów LZO w pomieszczeniu
Table 1. The results of measurements of VOCs in the office room

Lp.	Związek chemiczny	Stężenie
1	Formaldehyd	31 µg/m³
2	Etylobenzen	46 µg/m³
3	Styren	9 µg/m³
4	Ftalan dibutylu	61 µg/m³

W godzinach porannych nastąpiło pobranie próbki powietrza, dla której dokonano analizy za pomocą techniki chromatografii gazowej. Otrzymane wyniki przedstawiono w Tabeli 1.

3.2. Ocena występowania wybranych związków pod względem zdrowotnym

Głównymi chemicznymi zanieczyszczeniami powietrza wewnętrznego są lotne związki organiczne, pół-lotne związki organiczne, radon oraz tlenek i ditlenek węgla.

Wymienione związki chemiczne mają niewątpliwie wpływ na obniżenie jakości powietrza wewnętrznego. Prowadzi to do spadku wydajności pracy oraz efektywności przyswajania wiedzy. Każdy z zidentyfikowanych związków w badanym pomieszczeniu biurowym może niekorzystnie wpływać na zdrowie użytkowników tego pomieszczenia.

Formaldehyd klasyfikowany jest jako substancja szkodliwa i toksyczna. W 2006 r. Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem IARC uznała formaldehyd za rakotwórczy dla ludzi i zaklasyfikowała go do grupy 1. Ekspozycja na formaldehyd powoduje powstawanie nowotworów w obrębie nosa i gardła. Substancja ta działa drażniąco na błony śluzowe dróg oddechowych, spojówki oczu, skórę, powoduje nadreaktywność oskrzeli oraz zaburzenia czynności płuc [15].

Etylobenzen może działać depresyjnie na ośrodkowy układ nerwowy a także podrażniać oczy, gardło oraz błony śluzowe górnych dróg oddechowych. Ponadto obserwuje się uszkodzenia wątroby i nerek. Do tej pory nie przypisuje mu się działania teratogennego i mutagennego [16]. Jednakże wg IARC etylobenzen uznany jest za substancję przypuszczalnie rakotwórczą dla ludzi.

Styren powoduje podrażnienie śluzówki nosa, gardła i krtani oraz oczu. Może również wywoływać zaburzenia ze strony ośrodkowego układu nerwowego w postaci zmian neurobehawioralnych, upośledzenia narządu wzroku i słuchu. Przy długotrwałym narażeniu na styren możemy zaobserwować zmiany hematologiczne, endokrynologiczne i immunologiczne. Styren wykazuje działanie genotoksyczne, jednak nie ma potwierdzonego działania rakotwórczego. Zgodnie z klasyfikacją IARC został on zaklasyfikowany jako potencjalnie rakotwórczy, tak jak etylobenzen [17].

Ftalan dibutyli jest związkiem o potwierdzonym szkodliwym działaniu na rozrodczość i dziecko w łonie matki. Zgodnie z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1272/2008 ftalan dibutyli jest zaklasyfikowany jako substancja działająca szkodliwie na rozrodczość, kategoria zagrożeń 1B, z przypisanym zwrotem wskazującym rodzaj zagrożenia H360Df – może działać szkodliwie na dziecko w łonie matki; podejrzewa się, że działa szkodliwie także na płodność [18].

4. PRZEGLĄD BADAŃ NAD SKUTECZNOŚCIĄ FOTOKATALITYCZNYCH WYPRAW MALARSKICH

Zadaniem farb jest konserwacja oryginalnego stanu i wyglądu podłoża, dekoracja powierzchni przez zmianę lub odnowienie wyglądu oraz ochrona podłoża przed zniszczeniem. Kilkadziesiąt lat temu zaobserwowano, że możliwe jest dodawanie do farb specjalnych substancji, które wywołują efekt fotokatalitycznego utleniania. Fotokataliza jest procesem polegającym na przyspieszeniu reakcji chemicznych pod wpływem światła. Zjawisko

zachodzi zarówno przy świetle bezpośrednim, odbitym, rozproszonym słonecznym i sztucznym, aczkolwiek intensywność tego procesu jest silnie zmienna w zależności od parametrów oświetlenia. Obecnie jako katalizator do wypraw malarskich dodaje się najczęściej nanocząsteczki ditlenku tytanu (TiO_2). Nanocząsteczki TiO_2 mają rozmiary ok. $0,02 \mu\text{m}$ i są o rząd wielkości mniejsze od standardowych rozmiarów cząsteczek ditlenku tytanu dodawanych wcześniej jako pigment ($0,2 \div 0,4 \mu\text{m}$) [19]. Farby z dodatkiem nanocząsteczek TiO_2 działających jako katalizator posiadają zdolności do: czynnego samooczyszczania powierzchni, dezodoryzacji, oczyszczania powietrza ze szkodliwych oparów i gazów oraz ograniczenie rozwoju bakterii, pleśni i innych organizmów. Farby fotokatalityczne z wyglądu i sposobu użytkowania nie różnią się od zwykłych farb [20,21]. Charakteryzują się gładkimi, trwałymi powłokami, są śnieżnobiałe lub barwne oraz odporne na zmywanie na mokro. W farbach zawierających nanocząsteczki tytanu duży wpływ na skuteczność rozkładu zanieczyszczeń powietrza ma porowatość. Jej zwiększenie można uzyskać poprzez zastosowanie domieszki węglanu wapnia (CaCO_3). Niestety zbyt wysokie stężenia TiO_2 oraz CaCO_3 mogą powodować zmniejszenie trwałości matrycy farby [19].

Badania przeprowadzone przez Auvinen i Wirtanen [22] pokazują, że obecnie dostępne farby fotokatalityczne są w stanie rozkładać tylko bardziej reaktywne lotne związki organiczne. Jednocześnie produktem procesu nie są tylko ditlenek węgla i woda, ale również przykładowo formaldehyd, aldehyd octowy czy aceton. W badaniu zwrócono także uwagę wpływ fotokatalizy na stabilność niektórych rodzajów organicznych dodatków do farb i substancji wiążących. Ich dekompozycja może prowadzić do istotnego wzrostu stężeń aldehydów oraz ketonów i w konsekwencji do pogorszenia jakości powietrza w pomieszczeniu. Geiss i współpracownicy [23] zbadali możliwości tworzenia się związków karbonylowych podczas utleniania związków organicznych przez farby fotokatalityczne. Wykazali, że w czasie procesu fotokatalizy powstają produkty uboczne, które mogą kumulować się w pomieszczeniu. Zidentyfikowane przez nich powstałe związki to głównie formaldehyd, aldehyd octowy, propanol i aceton. Powstawanie tych związków maleje w trakcie napromieniowania. Głównym źródłem powstawania związków karbonylowych są polimery organiczne będące składnikiem farb.

W analizie przeglądowej Wang i współpracownicy [24] zestawili silnie zróżnicowane wyniki rozkładu kilku lotnych związków organicznych (głównie formaldehydu benzenu, toluenu, ksylenu) z wykorzystaniem zjawiska fotokatalizy. Badania wykazały konwersję zanieczyszczeń do innych prostszych związków z zakresie od 4 do 100%. Tak silne różnice w wynikach autorzy częściowo tłumaczą różnymi warunkami w trakcie przeprowadzanych eksperymentów.

Używane farby charakteryzowały się różną zawartością TiO_2 (od 1 do 20%). Stosowano naświetlanie powierzchni promieniami ultrafioletowymi o różnej długości fali (352 do 365 nm), a stężenia początkowe analizowanych substancji także się mocno różniły (od 15 do 93 ppb). Omawiana analiza literaturowa opisuje jednocześnie ciekawe badania nad modyfikacją klasycznego katalizatora TiO_2 w celu uzyskania zadowalających parametrów rozkładu LZO przy aktywacji światłem dziennym.

Innym sposobem intensyfikacji i stabilizacji efektu fotokatalizy jest budowa oczyszczaczy powietrza z wymuszonym przepływem [25]. W badaniach wykorzystujących fotokatalityczny oczyszczacz powietrza opisanych przez Kalarika i Wargockiego [26] wykazano dość ciekawe zjawisko. O ile stosowanie oczyszczacza zdecydowanie poprawiło odczuwalną jakość powietrza w pomieszczeniach testowych gdy były one zanieczyszczone przez materiały budowlane, używane filtry wentylacyjne, czy tradycyjne monitory komputerowe (typu CRT), to w odniesieniu do biozanieczyszczeń emitowanych przez ludzi zaobserwowano pogorszenie odczuwanej jakości powietrza.

Analiza przeprowadzona w niniejszym rozdziale wskazuje, że aby uzyskać wysoką skuteczność rozkładu fotokatalitycznego zanieczyszczeń powietrza we wnętrzach, należy bardzo starannie dobrać wyprawę malarską pod względem: wielkości cząsteczek TiO_2 , ich procentowego udziału w powłoce malarskiej, porowatości powierzchni, trwałości stosowanych dodatków wiążących, ewentualnych domieszek, długości fali promieniowania UV aktywującego proces fotokatalizy.

5. STANOWISKO BADAWCZE DO OCENY SKUTECZNOŚCI NEUTRALIZACJI LZO

W celu sprawdzenia skuteczności usuwania lotnych związków organicznych z powietrza wewnętrznego za pomocą procesu fotokatalizy zaplanowano realizację stanowiska badawczego w skali rzeczywistej. Zostanie ono wykonane w jednym z budynków Politechniki Łódzkiej. Będzie ono mieściło się w pomieszczeniu badawczym, w którym wykonano badania składu powietrza wewnętrznego pod kątem ilości i składu LZO. Na czas badania planuje się wykonanie na powierzchni ściany powłoki malarskiej z farby fotokatalitycznej oraz źródła promieniowania UV. Lampa UV pozwoli na zainicjowanie w okresie nocnym procesu fotokatalizy. Wykonany zostanie monitoring ilości zanieczyszczeń LZO przed procesem fotokatalizy jak i po tym procesie. Na tej podstawie oceniona zostanie skuteczność neutralizacji lotnych związków za pomocą fotokatalitycznych wypraw malarskich.

6. WNIOSKI

W ciągu ostatnich kilku lat zaczęto zwracać większą uwagę na problem jakości powietrza wewnętrznego. Zauważono, że wentylacja ustawiona na usuwanie nadmiaru ditlenku węgla może być niewystarczająca do usunięcia innych występujących w pomieszczeniu zanieczyszczeń. Okazuje się, że istotnym problemem jest emisja lotnych związków organicznych do powietrza wewnętrznego. Może ona następować z materiałów budowlanych, wyposażenia oraz w głównej mierze, w pomieszczeniach biurowych, ze sprzętu komputerowego, drukarek i kserokopiarek. Badania jakości powietrza pod względem zawartości lotnych związków organicznych w pomieszczeniu badawczym na Politechnice Łódzkiej wykazały zawartość takich związków jak formaldehyd, etylobenzen, styren i ftalan dibutyli. Autorzy zaproponowali metodę neutralizacji LZO w pomieszczeniu za pomocą procesu fotokatalizy z wykorzystaniem fotokatalitycznych wypraw malarskich i sposób oceny skuteczności takiego procesu.

EMISSION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS FROM OFFICE EQUIPMENT – STATE OF THE ART

Summary: The paper reviews current knowledge on the sources of volatile organic compounds in office spaces. The results of studies conducted in the United States, Iran and Taiwan are discussed. The authors also performed studies on the content of volatile organic compounds in the office building of the Lodz University of Technology. The study was carried out after intensive work of two computer sets in a room with a cubature of 33.8 m³ and reduced ventilation. Based on the gas chromatography analysis, 4 volatile organic compounds (VOCs) have been identified. An initial assessment of the impact of the identified compounds on the health and well-being of users has been done. In the last part of the work we have analyzed the experiences with applying paint with titanium dioxide for reduction of indoor air pollutants' concentrations and we have discussed in more detail the planned experiment consisting in using photocatalytic oxidation to decompose VOC.

Literatura

- [1] Sowa J., *Wpływ badań nad jakością powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach na ewolucję poglądów dotyczących wymaganej intensywności wentylacji*, Problemy Jakości Powietrza Wewnętrznego w Polsce 2001, (Red. T. Jędrzejewska-Ścibak, J. Sowa), s. 303-312, Warszawa 2002.
- [2] Sowa J., *Wpływ adsorpcji zanieczyszczeń na jakość powietrza w pomieszczeniach*, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Tom 2, s. 253-256, Łódź, 2007.
- [3] Stefaniak A.B., Breyse P. N., Murray P.M., Rooney B.C. Schaefer J., *An evaluation of employee exposure to Volatile Organic Compounds in three photocopy centers*, Environmental Research Section A 83, 162-173, 2000

ISSN 1734-4891