

INSTYTUT FIZYKI BUDOWLI KATARZYNA I PIOTR KLEMM S.C.

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

FIZYKA BUDOWLI
W TEORII I PRAKTYCE

BUILDING PHYSICS
IN THEORY AND PRACTICE

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ

P.

M 431

63

TOM VIII, Nr 1

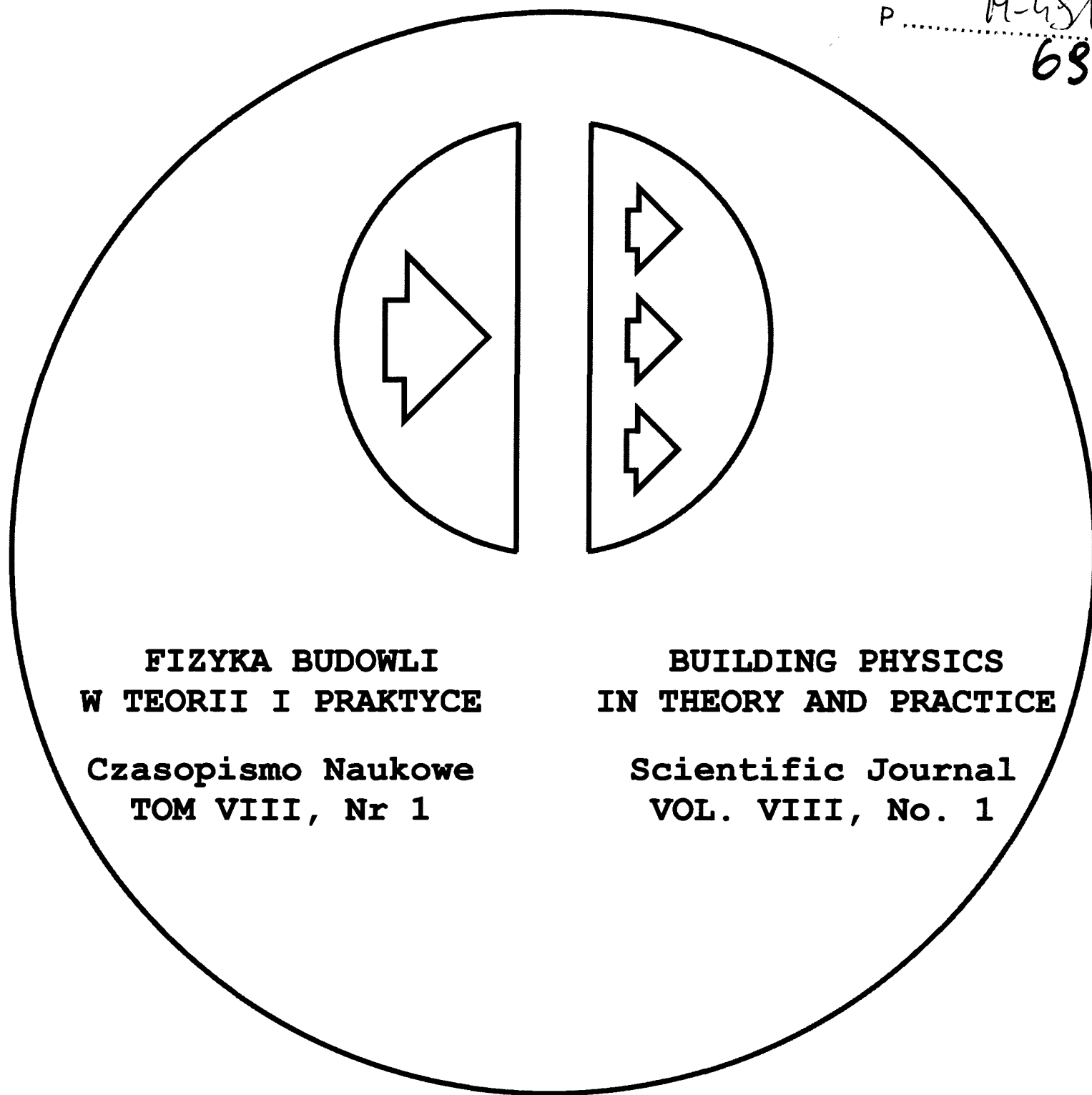
VOLUME VIII, No. 1

ŁÓDŹ 2016

1. The first part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various positions of the Board of Directors of the company.

Biblioteka Główna
Politechniki Łódzkiej

P M-481
68



INSTYTUT FIZYKI BUDOWLI KATARZYNA I PIOTR KLEMM S.C.

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

ŁÓDŹ 2016

RADA NAUKOWA - SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Stanislav Darula (Slovak Republic)
Prof. Halina Garbalińska (Poland)
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. Henk L. Schellen (Netherlands)
Prof. Jan Ślusarek (Poland)
Prof. Monika Woloszyn (France)
Prof. Jerzy Wyrwał (Poland)

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

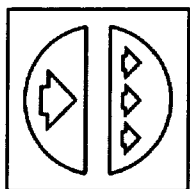
Instytut Fizyki Budowli Katarzyna i Piotr Klemm S.C.
Institute of Building Physics Katarzyna & Piotr Klemm S.C.
ul. Świetlana 7, 91-490 Łódź, **e-mail: poczta@fizykabudowli.com.pl**

ISSN 1734-4891

SPIS TREŚCI

TABLE OF CONTENTS

GRABARCZYK S., Dokładność prognozowania zapotrzebowania na ciepło w szklarni.....	9
ICKIEWICZ I., ICKIEWICZ J., Przyczyny złej izolacji akustycznej stropów międzypiętrowych w budownictwie mieszkaniowym	13
JĘDRZEJUK H., RUCIŃSKA J., Uproszczona ocena możliwości obniżenia zapotrzebowania na energię do chłodzenia poprzez zastosowanie okresowo działających elementów zacieniających	17
KLEMM K., Wykorzystanie badań modelowych w przybliżonej ocenie strumienia ciepła jawnego z powierzchni zabudowanej	21
KNERA D., HEIM D., Efektywność energetyczna eksperymentalnych fasad pv budynku biurowo-przemysłowego w warszawie	27
OLECHOWSKA M., NOWOŚWIAT A., Modele teoretyczne czasu pogłosu w analizie pomieszczeń audytoryjnych	33
ORLIK-KOŹDOŃ B., STEIDL T., Określenie właściwości cieplnych dla modyfikowanych geometrycznie materiałów izolacyjnych	39
ŻYCZYŃSKA A., DYŚ G., Wpływ zysków ciepła od promieniowania słonecznego na wartość wskaźnika nieodnawialnej energii pierwotnej w budynku	45



DOKŁADNOŚĆ PROGNOZOWANIA ZAPOTRZEBOWANIA NA CIEPŁO W SZKLARNI

Sławomir GRABARCZYK

*Politechnika Warszawska, Filia w Płocku
Instytut Budownictwa, Zespół Instalacji Budowlanych i Fizyki Budowli
ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, e-mail: slawekg@pw.plock.pl*

Streszczenie: Krótkoterminowe prognozy zapotrzebowania na ciepło dają możliwość zwiększenia wydajności produkcji ciepła, zmniejszenia zużycia paliwa i emisji produktów spalania do atmosfery. W artykule przedstawiono problem dokładności prognozowania zapotrzebowania na ciepło w szklarni z wykorzystaniem metod SARIMA. Źródłem informacji do analizy szeregów czasowych były dane eksploatacyjne zużycia ciepła.

Słowa kluczowe: szklarnia, prognozowanie, szereg czasowy, zapotrzebowanie na ciepło, błąd prognozy

1. WPROWADZENIE

W artykule przedstawiono zagadnienie dotyczące dokładności prognozowania zapotrzebowania na ciepło w szklarni, budynku o istotnym wpływie zewnętrznych czynników klimatycznych.

Prognozowanie zapotrzebowania na ciepło można zrealizować korzystając z lokalnych prognoz meteorologicznych [3], wprowadzając informacje o parametrach powietrza zewnętrznego do modelu budynku, który jest sprzęgnięty z systemem sterowania i pozwala na bieżąco określić potrzeby cieplne obiektu.

Stosowanie innych narzędzi prognostycznych w analizie zapotrzebowania na ciepło było przedmiotem szeregu publikacji, min. dotyczących systemów ciepłowniczych [12] czy obiektów szklarniowych [5][6]. Metodami, które pozwalają na identyfikację natury zjawiska są szeregi czasowe, dające możliwość zastosowania ich do innych danych. Służą one do prognozowania przyszłych wartości szeregu czasowego, bazując tylko i wyłącznie na obserwacjach poprzedzających zmiennej prognozowanej. Zaletą takiej prognozy jest oczywiście niezależ-

nienie się od szeregu zmiennych, które mają wpływ na wielkość zużycia ciepła.

Modele szeregów czasowych ARIMA zdobyły popularność w wielu dziedzinach, głównie w wyniku pracy opublikowanej przez Boxa i Jenkinsa [2]. Przykładem może tu być zastosowanie szeregów czasowych SARIMA do prognozowania popytu na energię pierwotną w skali całego państwa na przykładzie Turcji [4], czy też przedmiotem analiz w przewidywaniu zapotrzebowania na energię elektryczną [10][13].

Zastosowanie szeregów czasowych ARMA zostało wysoko ocenione, jako jedna z metod o wysokiej dokładności w szacowaniu potrzeb cieplnych budynków, mimo że są to metody o umiarkowanym stopniu trudności [1]. Modele szeregów czasowych ARIMA i SARIMA, z racji na większą liczbę parametrów, są modelami o większym stopniu trudności, to jednak zalety tych metod i możliwa do osiągnięcia duża dokładność spowodowały o zastosowaniu ich w prognozowaniu zapotrzebowania na ciepło dla szklarni.

Prognozowanie zapotrzebowania na ciepło w obiektach szklarniowych wynika z konieczności zapewnienia odpowiedniej temperatury wewnętrznej. Lekka konstrukcja szklarni i znaczny wpływ zmiennych warunków zewnętrznych na mikroklimat powoduje, że utrzymanie zadanej temperatury w pewnych okresach w szklarni może sprawiać problem. Ponadto, argumentem przemawiającym za stosowaniem prognoz zapotrzebowania na ciepło w szklarni jest brak akumulacji ciepła w obiekcie tego typu oraz znaczna bezwładność źródła ciepła i systemu jego dystrybucji, zwłaszcza w dużych kompleksach szklarniowych.

W szeregach ARIMA można zaobserwować dwa typowe procesy. Pierwszy z nich to proces autoregresyjny, który

określa że wartość szeregu jest sumą składnika losowego oraz kombinacji poprzednich obserwacji. Drugi to proces średniej ruchomej, w którym każdy element szeregu może pozostawać pod wpływem realizacji składnika losowego w okresach przeszłych, który to wpływ nie może być wyjaśniony przez składnik autoregresyjny. Oprócz typowych procesów, z uwagi na konieczność doprowadzenia szeregu do stacjonarności, wprowadza się tzw. integrację w/w procesów, realizowaną przez różnicowanie wartości szeregu.

Podstawowymi wymogami zastosowania szeregów ARIMA w prognozowaniu konkretnych danych jest to aby średnia procesu w każdej chwili była taka sama, wariancja procesu również, funkcje autokorelacji zależały od opóźnienia a nie zależały od czasu. Modele ARIMA nie nadają się najlepiej do prognozowania szeregów z sezonowością, dlatego też wprowadza się jeszcze do modelu różnicowanie sezonowe (model SARIMA).

Ocenę dokładności prognozowania i trafności prognoz możemy dokonać stosując mierniki dokładności *ex ante* i *ex post*. Błędy *ex ante* to oczekiwana różnica pomiędzy wartością prognozy oraz nieznaną, w chwili stawiania prognozy, wartością rzeczywistą. Wartość tego błędu jest związana z okresem, na który stawia się prognozę a także dobrocią dopasowania modelu do danych. Im dalej w przyszłość stawiane są prognozy tym większą niepewnością są obarczone. Właściwszą oceną trafności wyznaczonych prognoz jest ustalenie błędów *ex post*, gdy zaistnieje ku temu okazja. Błąd *ex post*, ustalany po zaistnieniu obserwacji zmiennej prognozowanej w czasie i sprawdzeniu wartości prognoz z rzeczywistymi wynikami. Takie prognozy, wyznaczone sekwencyjnie, umożliwiają zdiagnozowanie ich słabej jakości, pozwalają na weryfikację modelu i wprowadzenie do niego poprawek. Korzyścią jest również to, że niska trafność prognoz jest zwykle wynikiem nieuwzględnienia w modelu prognostycznym pojawiającej się nowej informacji. Trafność prognoz ilościowych w typowym szeregu czasowym można określić na kilka sposobów. Stosuje się w tym celu mierniki bezwzględne – zachowujące jednostkę pomiaru zmiennej prognozowanej oraz mierniki względne – umożliwiające porównanie prognoz uzyskanych różnymi metodami prognostycznymi.

Celem przedstawionych w pracy analiz było zwrócenie uwagi na zagadnienie dokładności prognoz zapotrzebowania na ciepło dla budynku szklarni.

2. ZAŁOŻENIA DO BADAŃ I ANALIZ

Obiektem badań jest budynek szklarni z ekranem termizolacyjnym, którego zadaniem jest dopasowanie właściwości przegrody zewnętrznej do zmiennych warunków otoczenia. W analizach wykorzystano zbiór danych

z godzinowym interwałem między kolejnymi pomiarami zużycia energii. Taki odstęp między kolejnymi pomiarami, pozwala na odzwierciedlenie funkcjonowania wyposażenia technicznego szklarni, obiektu o istotnym wpływie zewnętrznych warunków klimatycznych na temperaturę wewnętrzną a tym samym na zużycie ciepła.

Badania przeprowadzono na przełomie 2007 i 2008 roku. Zgromadzony materiał badawczy obejmuje wyniki pomiarów z miesięcy okresu zimowego. Łączna ilość danych wykorzystanych w analizie to 4344 rekordy.

Źródłem danych o wielkości zużycia ciepła jest ciepłomierz zainstalowany na przewodzie powrotnym systemu grzewczego. Przyrząd ten mierzy wartości zużycia ciepła, a zatem zarejestrowany szereg danych to tzw. szereg nieujemny.

Szereg danych pomiarowych zużycia ciepła nie jest typowym szeregiem dla którego można było użyć wskaźników [9][11] związanych z identyfikacją liczby parametrów modelu. Wstępne obserwacje i charakter gromadzonych danych wskazywały, że są one obarczone sezonowością, a zatem spodziewano się, że docelowo będzie to model SARIMA.

Estymację parametrów szeregu oraz obliczenia sumy kwadratów reszt, przy zadanych parametrach, wykonano metodą dokładną największej wiarygodności według Melarda, bez uwzględniania stałej.

W celu przeprowadzenia analiz prognozowania zapotrzebowania na ciepło, szereg danych został doprowadzony do stacjonarności. Dodatkowo szereg danych został zlogarytmowany w celu stabilizacji wariancji. Po wstępnych analizach przyjęto, że opóźnienie sezonowe (okres) stosowane dla sezonowych parametrów autoregresyjnych i średniej ruchomej jest równe 12.

W wyniku analiz stwierdzono, że najodpowiedniejszy w prognozowaniu zapotrzebowania na ciepło będzie model SARIMA (2,1,2)(2,0,1)¹² czyli model autoregresyjny drugiego rzędu, z dwoma niesezonowymi parametrami średniej ruchomej, w którym są dwa sezonowe parametry autoregresyjne oraz jeden sezonowy parametr średniej ruchomej. Parametry te zostały oszacowane dla szeregu po jednokrotnym różnicowaniu, przy opóźnieniu równym jeden. Wyniki estymacji parametrów modelu SARIMA przedstawiono w Tab. 1.

Ocenę parametrów w module szeregów czasowych obliczono wyznaczając tak zwane asymptotyczne błędy standardowe. Są one obliczane z macierzy pochodnych cząstkowych drugiego rzędu, która jest aproksymowana przy pomocy różnicowania skończonego. Zminimalizowana suma kwadratów reszt (warunkowa), dla określonych w analizach parametrów modelu SARIMA, wynosi 34,5% wartości początkowej sumy kwadratów.

Tabela 1. Wyniki estymacji modelu SARIMA.
Table 1. SARIMA model estimation results.

parametr		Asympt. błąd std.	Asympt. t	p	Dolna gr 95% p. ufn.	Górna gr 95% p. ufn.
p(1)	0,598	0,0428	13,97	0,00	0,514	0,682
p(2)	0,225	0,0426	5,28	0,00	0,142	0,309
q(1)	0,723	0,0435	16,64	0,00	0,638	0,808
q(2)	-0,213	0,0400	-5,32	0,00	-0,291	-0,134
Ps(1)	0,846	0,0161	52,56	0,00	0,815	0,878
Ps(2)	0,149	0,0159	9,35	0,00	0,118	0,180
Qs(1)	0,935	0,0072	129,78	0,00	0,921	0,949

Wykonane testy i analizy pozwoliły na określenie modelu szeregu czasowego SARIMA, uwzględniającego zarówno opóźnienia autoregresyjne oraz elementy średniej ruchomej przy jednokrotnym zróżnicowaniu szeregu. Model SARIMA przyjęto na podstawie analizy wyników dopasowania modelu, w których parametry przy opóźnieniach autoregresyjnych oraz dla średniej ruchomej są statystycznie istotne $p < 0.05$. Analiza reszt modelu wykazała, że mają one w przybliżeniu rozkład normalny.

Analiza autokorelacji cząstkowej reszt modelu dla kolejnych opóźnień autoregresyjnych wykazała, że nie istnieją korelacje dla 12 kolejno następujących po sobie obserwacji, a zatem szereg jest poprawnie zbudowany, przy czym istotne jest to, że siła korelacji w tej analizie jest ważniejsza niż efektywność estymacji [8].

Tak zbudowany model prognostyczny można poddać ocenie dokładności prognoz, których najprostszymi miernikami są błędy bezwzględne:

- bezwzględny błąd prognozy ex post, obliczany, jako różnica zmiennej obserwowanej y_t i zmiennej prognozowanej y_t^p :

$$E_t = y_t - y_t^p \quad (1)$$

- średni błąd ME , określany w danym momencie lub okresie:

$$ME = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m (y_t - y_t^p) \quad (2)$$

gdzie, m oznacza moment lub okres analizowanego przedziału czasu;

- średni błąd bezwzględny MAE , określany zależnością:

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m |y_t - y_t^p| \quad (3)$$

- pierwiastek błędu średniokwadratowego $RMSE$, określany ze wzoru:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{t=1}^m (y_t - y_t^p)^2} \quad (4)$$

- średni bezwzględny skalowany błąd $MASE$, określony równaniem:

$$MASE = \frac{E_t}{\frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m |y_t - y_{t-1}|} \quad (5)$$

który to miernik stanowi porównywanie otrzymanego błędu z błędem, który popełnilibyśmy konstruując prognozy za pomocą metody naiwnej – w tym przypadku, jako prognozę dla kolejnych okresów przyjmujemy ostatnią z zaobserwowanych wartości.

Z mierników względnych wyróżnić trzeba:

- średni bezwzględny błąd procentowy $MAPE$, określany zależnością:

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \left| \frac{y_t - y_t^p}{y_t} \right| \cdot 100 \quad (6)$$

- względny błąd predykcji ex post, obliczany, jako:

$$V_{RMSE} = \frac{RMSE}{|\bar{y}_t|} \cdot 100 \quad (7)$$

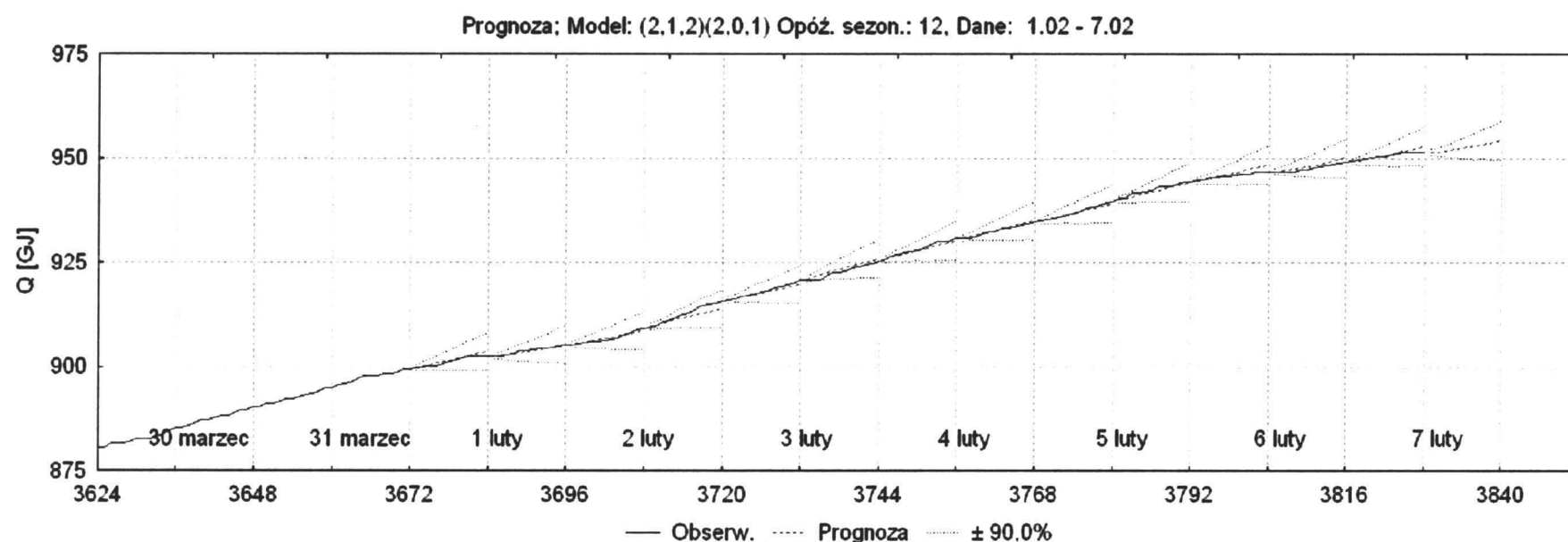
3. WYNIKI BADAŃ

Pełny opis analiz przedmiotowego modelu SARIMA przedstawiono we wcześniejszej publikacji [7]. Analiza wyników prognoz zapotrzebowania na ciepło dla szklarni w okresie od listopada do kwietnia pozwala stwierdzić, że jeden miesięczny okres danych pozwala na budowę modelu SARIMA o opisanych wcześniej parametrach, ale jeden z nich jest nieistotny statystycznie. Dwumiesięczny okres, będący podstawą do budowy modelu prognostycznego, pozwala na uzyskanie stabilnego szeregu czasowego o istotnych statystycznie parametrach.

W artykule zaprezentowano przedziałowe wyniki prognozy dla 12 godzinnych okresów (po dwie prognozy dla każdej doby) przy założeniu, że prognozę zapotrzebowania na ciepło wyznacza się od godz. 0:00 do godz. 11:00 oraz od godz. 12:00 do godz. 23:00.

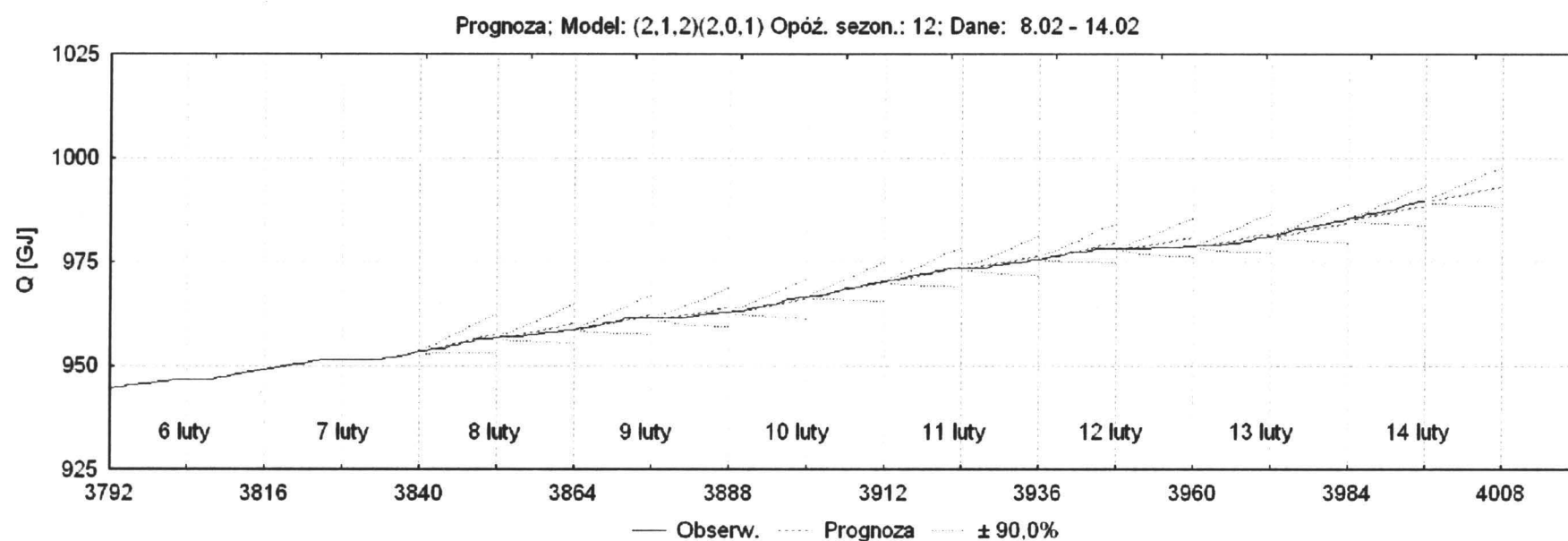
Prognozy zapotrzebowania na ciepło dla szklarni wykonano dla dwóch przykładowych miesięcy: lutego - miesiąca okresu zimowego, i dla kwietnia - miesiąca okresu przejściowego. Na rys. 1 - 4 przedstawiono wyniki takich prognoz zapotrzebowania na ciepło wraz z przedziałem ufności, nałożone na rzeczywisty przebieg zużycia ciepła w miesiącu lutym. Prognozy wykonywano sekwencyjnie, a każdy rysunek przedstawia wyniki dla tygodnia.

W każdym momencie prognozowania zapotrzebowania na ciepło, wykonywanym sekwencyjnie dla 12 kolejnych obserwacji, oceny parametrów modelu SARIMA, w miesiącu lutym dla 56 prognoz, a w miesiącu kwietniu dla 60 prognoz, wszystkie parametry okazały się istotne statystycznie, tzn. model w całym okresie prognozowania był pozytywnie weryfikowany.



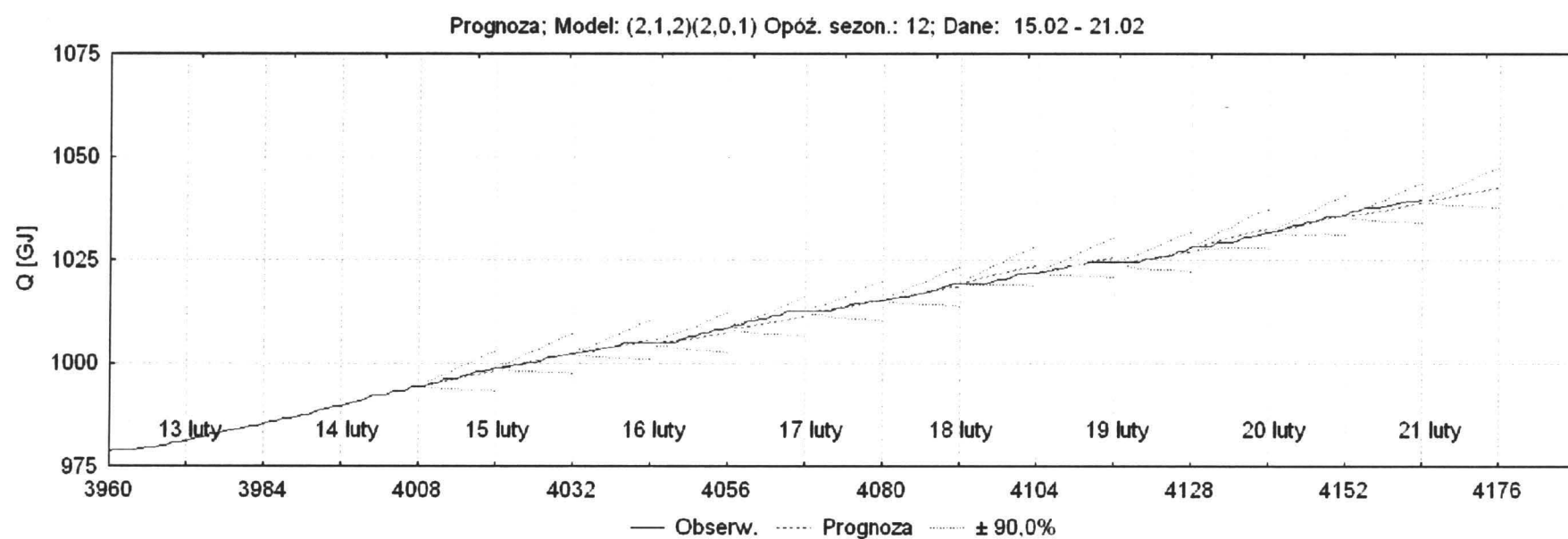
Rys. 1. Wykres zmiennej obserwowanej i prognozowanej z 90% przedziałem ufności: 1 – 7 luty.

Fig. 1. The graph of value of the observed and the forecasts with the 90% confidence limits: 1 – 7 February.



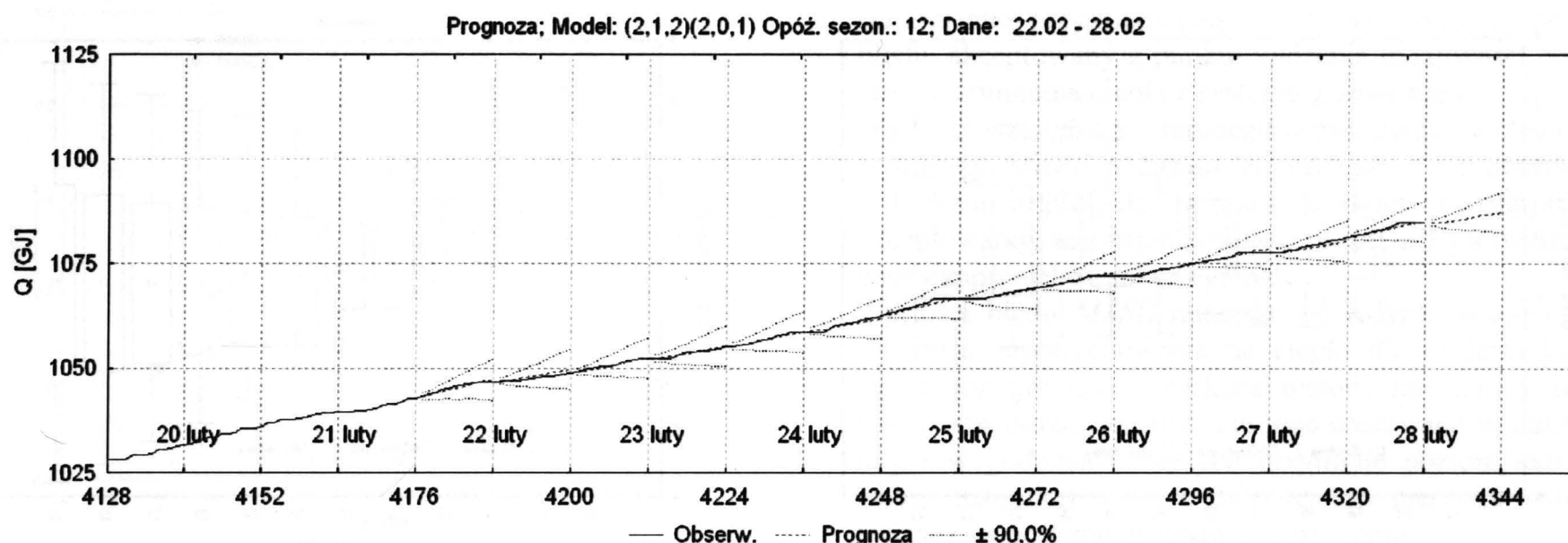
Rys. 2. Wykres zmiennej obserwowanej i prognozowanej z 90% przedziałem ufności: 8 – 14 luty.

Fig. 2. The graph of value of the observed and the forecasts with the 90% confidence limits: 8 – 14 February.



Rys. 3. Wykres zmiennej obserwowanej i prognozowanej z 90% przedziałem ufności: 15 – 21 luty.

Fig. 3. The graph of value of the observed and the forecasts with the 90% confidence limits: 15 – 21 February.



Rys. 4. Wykres zmiennej obserwowanej i prognozowanej z 90% przedziałem ufności: 22 – 28 luty.
Fig. 4. The graph of value of the observed and the forecasts with the 90% confidence limits: 22 – 28 February.

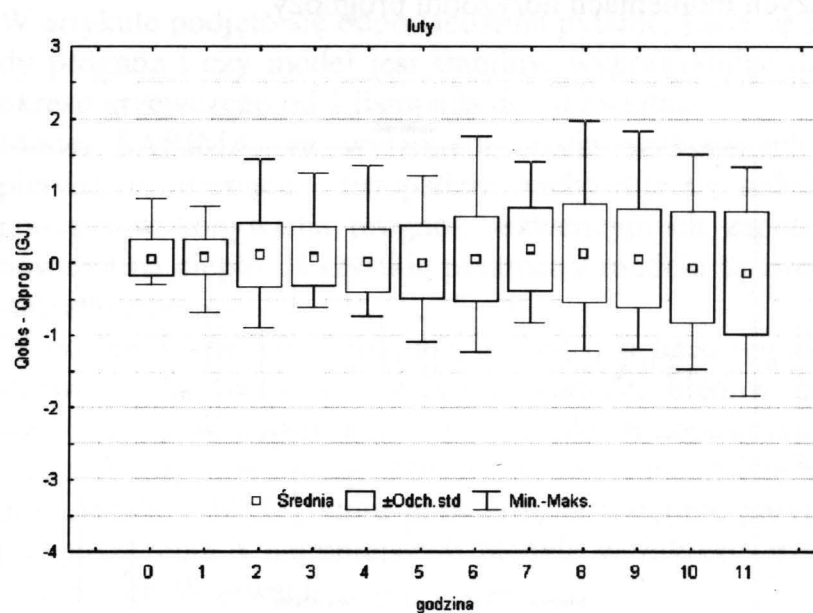
Wyniki takich prognoz sekwencyjnego zapotrzebowania na ciepło dla szklarni były podstawą obliczenia błędu prognozy ex post.

Z uwagi na charakter danych rzeczywistego zużycia energii zaproponowano wykorzystanie w ocenie jakości prognoz błędu bezwzględnego oraz pierwiastka błędu średniokwadratowego prognoz ex post. Przyczyną takiego założenia jest to, że:

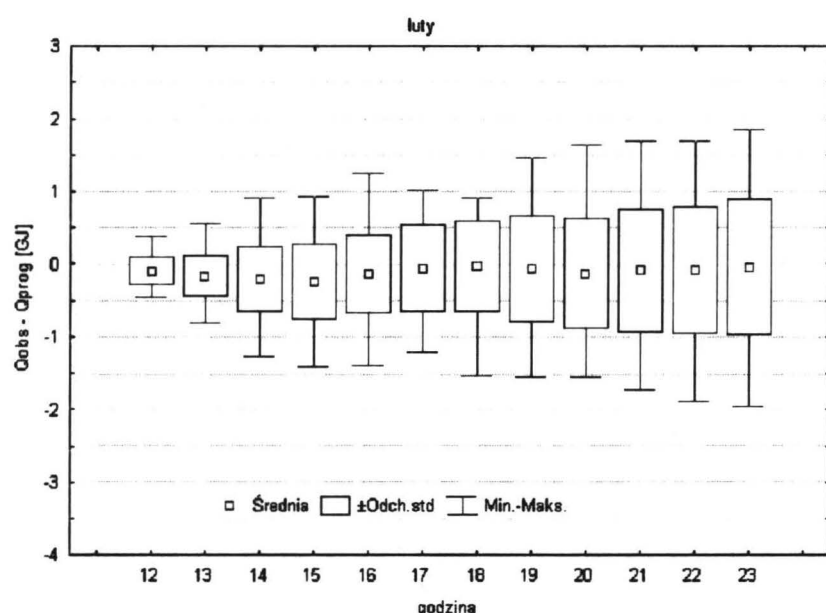
- obliczenie błędu względnego w odniesieniu do wartości pomiarowej, wskazanej przez przelicznik ciepłomierza oznacza, że błąd ten maleje wraz z czasem funkcjonowania systemu grzewczego – szereg danych pomiarowych niu-jemny; po za tym błąd prognozy do wartości szeregu nieróżnicowanego, to nadmiernie optymistyczny błąd względny, tu rzędu dziesiątych i setnych części procenta;
- obliczenie błędu prognozy do wartości szeregu zróżnicowanego – może powodować zawyżanie średniego błędu prognozy, który „stanowi” znaczącą część wartości prognozowanej;
- obserwacje zerowe rzeczywistego zużycia energii, będące podstawą prognoz, nie pozwalają na określenie właściwego błędu względnego, ponieważ rośnie on do nieskończoności. Wstępna ocena modelu SARIMA pod względem dokładności prognoz opiera się zatem na różnicy bezwzględnej wartości obserwowanej i prognozowanej, czyli bezwzględny błąd prognozy ex post.

Zwiększenie dokładności prognoz uzyskać przez skrócenie czasookresu między wyznaczaniem prognoz, ponieważ zaobserwowane różnice są najmniejsze dla pierwszych trzech obserwacji po wykonaniu prognozy - przykładowe wykresy wykonane dla lutego i kwietnia ilustrują to graficznie (rys. 5 - 8).

W miesiącu lutym obserwowano częste występowanie dostaw strumienia ciepła do systemu grzewczego szklarni w całym przekroju doby, a zatem wartości średniego bezwzględnego błędu prognozy ex post oscylują wokół zera, przy czym rozrzut ich występowania i odchylenie standardowe jest typowe dla takiego rodzaju danych w szeregu czasowym (Rys. 5 i 6).

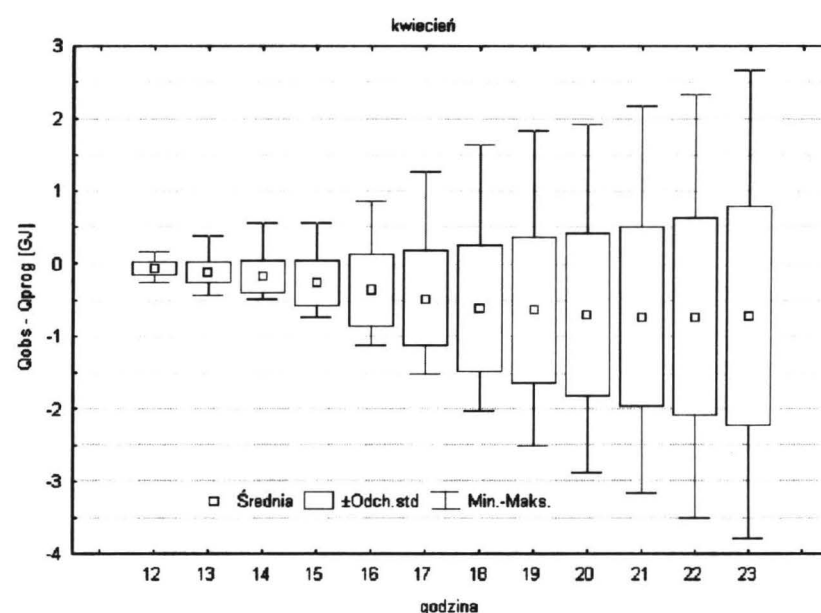


Rys. 5. Bezwzględny błąd prognozy ex post – luty, godz.: 0:00 – 11:00.
Fig. 5. Absolute forecast error ex-post – February, hour: 0:00 – 11:00.



Rys. 6. Bezwzględny błąd prognozy ex post – luty, godz.: 12:00 – 23:00.

Fig. 6. Absolute forecast error ex-post – February, hour: 13:00 – 24:00.



Rys. 8. Bezwzględny błąd prognozy ex post – kwiecień, godz.: 12:00 – 23:00.

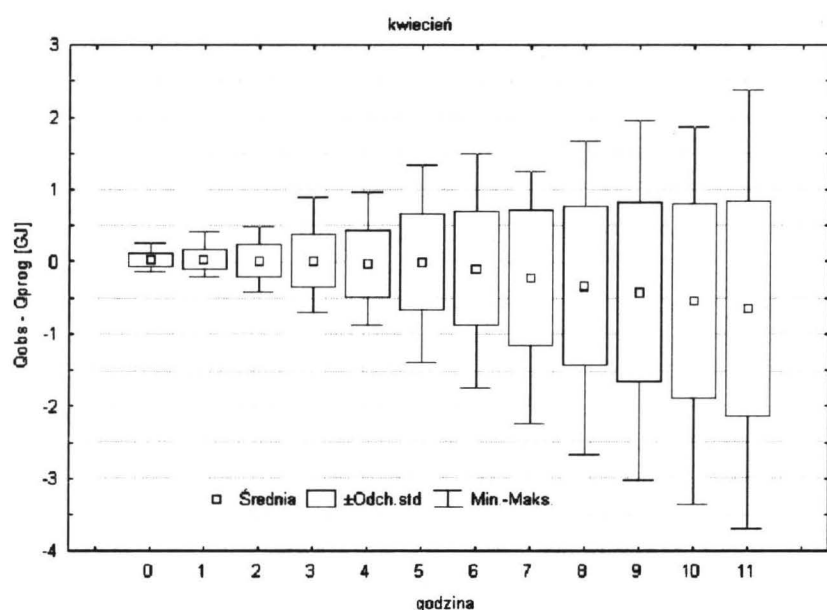
Fig. 8. Absolute forecast error ex-post – April, hour: 12:00 – 23:00.

Analiza bezwzględnego błędu prognozy ex post w przekroju dobowym dla danych z miesiąca kwietnia (Rys. 7 i 8) wykazuje, że wartości błędu na początku okresu prognozy są niewielkie, ale ich rozrzut występowania jak i odchylenie standardowe w miarę oddalania się od momentu wykonania prognozy znacząco większe, niż miało to miejsce dla danych z miesiąca lutego (Rys. 5 i 6). Powodem jest występowanie obserwacji zerowych zużycia ciepła, a w konsekwencji obserwowania rosnącej wartości błędu w późniejszych momentach horyzontu prognozy.

Wykresy na rys. 5 - 8 ilustrują występowanie najmniejszego błędu dla pierwszych trzech obserwacji prognozowanych. W związku z tym postanowiono zwrócić uwagę na trafność prognozy z punktu widzenia horyzontu, który tu przyjęto, jako równy 12 obserwacjom.

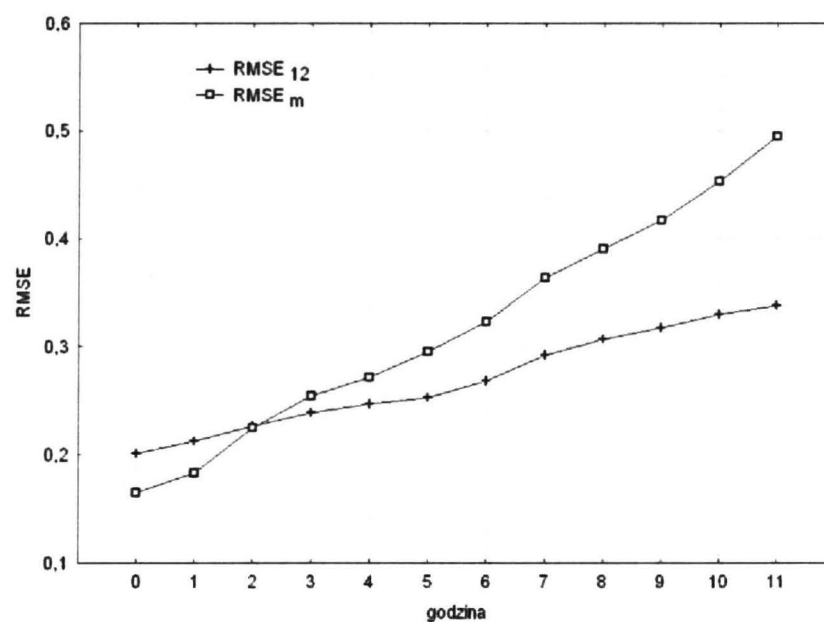
W celu określenia dokładności prognozy, a jednocześnie zminimalizowania błędu, postanowiono określić przedział czasu, dla którego prognoza jest dopuszczalna.

Wyznaczono w tym celu wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego prognoz ex post w analizowanych zakresach godzinowych. Na rys. 9 i 10 przedstawiono wartości tego błędu obliczone dla całego horyzontu prognozy $RSME_{12}$ oraz dla poszczególnych momentów horyzontu $RSME_m$.



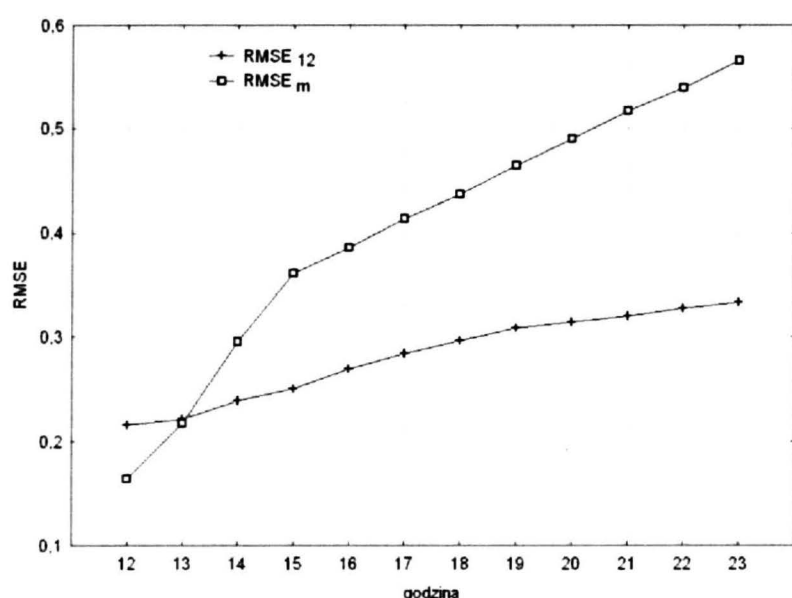
Rys. 7. Bezwzględny błąd prognozy ex post – kwiecień, godz.: 0:00 – 11:00.

Fig. 7. Absolute forecast error ex-post – April, hour: 0:00 – 11:00.



Rys. 9. Pierwiastek błędu średniokwadratowego prognoz ex post – luty, godz.: 0:00 – 11:00.

Fig. 9. Root mean square error ex post forecasts – February, hour: 0:00 – 11:00.



Rys. 10. Pierwiastek błędu średniokwadratowego prognoz ex post – luty, godz.: 12:00 – 23:00.

Fig. 10. Root mean square error ex post forecasts – February, hour: 12:00 – 23:00.

Wartości błędu *RSME* również wskazują, że błąd prognozy zapotrzebowania na ciepło jest najmniejszy w 2 - 3 pierwszych obserwacjach.

W celu ustalenia okresu dopuszczalnej prognozy, postanowiono wykorzystać średni bezwzględny błąd procentowy *MAPE* oraz średni bezwzględny błąd skalowany *MASE*.

Wyniki obliczeń błędów prognozy zapotrzebowania na ciepło, dla pierwszych obserwacji od momentu prognozy, przedstawiono w Tab. 2.

Tabela 2. Średni bezwzględny błąd procentowy *MAPE* i średni bezwzględny błąd skalowany *MASE*.

Table 2. Mean absolute percentage error *MAPE* and mean absolute scaled error *MASE*.

luty						
godz.	0	1	2	3	4	5
<i>MAPE</i>	8,9	12,8	17,2	23,8	27,4	31,5
<i>MASE</i>	0,6	0,43	0,77	0,87	0,95	1,15
godz.	12	13	14	15	16	17
<i>MAPE</i>	16,5	17,8	19,1	24,3	30,1	34,5
<i>MASE</i>	0,77	0,87	0,93	1,24	1,51	1,80
kwiecień						
godz.	0	1	2	3	4	5
<i>MAPE</i>	14,5	17,3	19,0	25,1	27,6	29,8
<i>MASE</i>	0,37	0,69	0,98	1,16	1,72	2,54
godz.	12	13	14	15	16	17
<i>MAPE</i>	17,2	18,9	22,7	26,5	29,6	33,1
<i>MASE</i>	0,68	0,85	1,04	1,20	1,48	1,82

W przypadku obiektów szklarniowych, z racji na istotny wpływ warunków zewnętrznych i małą bezwładność obiektu, zdaniem autora akceptowane różnice w prognozach zapotrzebowania na ciepło, powinny wynosić do 20% warto-

ści zmiennej prognozowanej. Jest to wystarczający poziom błędu, akceptowany z punktu widzenia możliwości dostarczenia strumienia ciepła z systemu grzewczego.

Wartości względnego średniego bezwzględnego błędu procentowego *MAPE* wskazują, że pierwsze 2 – 3 obserwacje w horyzoncie prognozy w miesiącu kwietniu mają poziom akceptowalny, natomiast w miesiącu lutym 3 pierwsze prognozy zapotrzebowania na ciepło.

Wartości błędu *MASE* mniejsze od jedynki wskazują, że prognoza zapotrzebowania na ciepło dla szklarni będzie lepsza niż prognoza uzyskana metodą naiwną. A zatem można stwierdzić, że pierwsze pięć obserwacji w miesiącu lutym w godzinach nocnych przyjmuje poziom akceptowalny, natomiast w porze dziennej trzy pierwsze wartości prognoz ex post zapotrzebowania na ciepło.

Wartości błędu *MASE* dla prognoz w miesiącu kwietniu przyjmują poziom akceptowalny dla trzech obserwacji w porze nocnej oraz dwóch obserwacji w porze dnia.

Średni bezwzględny skalowany błąd *MASE*, z racji na konstrukcję, jest dobrym narzędziem do oceny danych z sezonowością, a zatem pozwala na ocenę dokładności prognoz w przypadku szeregu czasowego nieujemnego, jakim są dane o zużyciu ciepła w oparciu, o które zbudowano model SARIMA.

4. WNIOSKI

Przedstawione wyniki analiz pozwoliły na ocenę dokładności prognoz zapotrzebowania na ciepło w szklarni przy użyciu zaproponowanego modelu SARIMA (2,1,2) (2,0,1)¹².

W artykule podjęto się odpowiedzi na pytanie, jakie są błędy prognoz i czy model jest stabilny, wykorzystując dane okresu grzewczego od 1 listopada do 30 kwietnia.

Model SARIMA, za wyjątkiem analiz wykonanych w pierwszym miesiącu – listopadzie, zachowuje się stabilnie podczas wykonywania prognoz sekwencyjnych zapotrzebowania na ciepło. Wszystkie parametry modelu są istotne statystycznie.

W ocenie dokładności prognoz, w celu ich lepszego zilustrowania, wykorzystano głównie wartości błędów bezwzględnych. W podjęciu decyzji o ustaleniu dopuszczalnej długości okresu prognozy, zdecydowano się na analizę błędów *MAPE* i *MASE*, które potwierdzają wstępnie przyjęte przypuszczenia o najmniejszym błędzie w zakresie trzech pierwszych obserwacji.

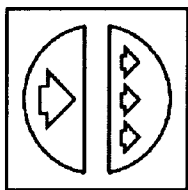
Analizując wartości błędów przedstawionych w Tab. 2 oraz błędów bezwzględnych zilustrowanych graficznie należy stwierdzić, że można proponować w przypadku analizowanego obiektu szklarniowego prognozowanie zapotrzebowania na ciepło w dopuszczalnym zakresie trzech obserwacji prognozowanych, przy czym błąd prognozy w większości prognoz ex post zapotrzebowania na ciepło powinien mieścić się w granicach kilkunastu procent.

PRECISION OF FORECASTING THE HEAT DEMAND IN GREENHOUSE

Summary: Short-term heat demand predictions give possibility for increasing efficiency of heat production, reduce fuel consumption and connected with it emission decreasing from combustion products to the atmosphere. The paper presents a problem precision of forecasting heat demand in a greenhouse building using SARIMA methods. Information source for the analysis of time series were operating data of energy consumption.

Literatura

- [1] ASHRAE Handbook Fundamentals. *Energy Estimating and Modeling Methods*. ASHRAE, Atlanta 2005
- [2] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., *Time series analysis*. Holden Day, San Francisco 1970
- [3] Chalabi Z.S., Bailey B.J., Wilkinson D.J., *A-real-time optimal control algorithm for greenhouse heating*. Computers and electronics in agriculture 15 (1996) 1–13
- [4] Ediger V.S., Akar S., *ARIMA forecasting of primary energy demand by fuel in Turkey*. Energy Policy 35 (2007) 1701–1708
- [5] Grabarczyk S., *Prognozowanie zużycia energii cieplnej w szklarniach z ekranami termoizolacyjnymi*. Proceedings of XI International Conf. ACAP&DH. Wrocław-Szklarska Poręba 2005, 175 – 180
- [6] Grabarczyk S., *Prognozowanie zużycia energii cieplnej i zmian temperatury wewnętrznej szklarni z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych*. Energia i Budynek 12 (2008) 40–45
- [7] Grabarczyk S., *Zastosowanie szeregów czasowych w prognozowaniu zapotrzebowania na ciepło w szklarni*, Building Physics in Theory and Practice (2013) 19–24
- [8] Kendall, M., Ord, J. K., *Time series* (3rd ed.). Griffin, London 1990
- [9] Pankratz, A., *Forecasting with univariate Box-Jenkins models: Concepts and cases*. Wiley, New York 1983
- [10] Sumer K.K., Goktas O., Hepsag A., *The application of seasonal latent variable in forecasting electricity demand as an alternative method*. Energy Policy 37 (2009) 1317–1322
- [11] Vandaele, W., *Applied time series and Box-Jenkins models*. Academic Press, New York 1983
- [12] Wojdyga K., *Prognozowanie zapotrzebowania na ciepło w miejskich systemach ciepłowniczych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007
- [13] Zhu S., Wang J., Zhao W., Wang J., *A seasonal hybrid procedure for electricity demand forecasting in China*. Applied Energy 88 (2011) 3807–3815



PRZYCZYNY ZŁEJ IZOLACJI AKUSTYCZNEJ STROPÓW MIĘDZYPIETROWYCH W BUDOWNICTWIE MIESZKANIOWYM

Irena ICKIEWICZ*, Jerzy ICKIEWICZ**

* Politechnika Białostocka, Zakład Podstaw Budownictwa i Fizyki Budowli
ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok, e-mail: i.ickiewicz@pb.edu.pl

** Politechnika Białostocka, Katedra Budowy i Eksploatacji Maszyn
ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok, e-mail: j.ickiewicz@pb.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono najczęstsze przyczyny źle wykonanych izolacji akustycznych masywnych stropów np. płyt żelbetowych jak i lekkich stopów drewnianych w budynkach wielorodzinnych. Konsekwencją nieuwzględnienia przez projektanta zasad poprawnego zaprojektowania izolacji akustycznej stropu na przenikający hałas (odgłosy kroków, rozmowa itp.) jest niespełnienie wymagań normowych izolacyjności akustycznej stropów od dźwięków powietrznych jak i uderzeniowych. Dla wybranych budynków mieszkalnych zamieszczono wyniki pomiarów akustycznych jak i ich analizę. Wyniki pomiarów pochodzą z opinii technicznych wykonanych przez autorów artykułu. Zamieszczono również aktualne wymagania normowe jak i propozycje poprawnych rozwiązań.

Słowa kluczowe: fizyka budowli, akustyka, izolacja akustyczna stropów

1. WPROWADZENIE

Dźwięk jest zjawiskiem falowym spowodowanym drganiem cząstek ośrodka sprężystego, np. powietrza, ciała stałego, cieczy. Głównymi emiterami uciążliwych dźwięków przenikających do budynków są: środki transportu i komunikacji (hałas komunikacyjny), użytkownicy sąsiednich mieszkań (hałas bytowy) oraz hałas instalacyjny. Skala dźwięku jest skalą logarytmiczną i zmiana nawet o kilka decybeli ma znaczący wpływ na komfort akustyczny w pomieszczeniu (w bardzo szybkim czasie może przybrać formę hałasu).

Hałas i związane z nim wibracje zaliczane są aktualnie do najbardziej uciążliwych czynników zanieczyszczenia środowiska.

Aby chronić środowisko przed hałasem ustanowiono szereg ustaw (norm) mających na celu ograniczenie tego zjawiska.

Za nieprzestrzeganie tych przepisów określono kary, które obowiązują nie tylko w krajach UE.

2. ANALIZA PROPAGACJI HAŁASU BYTOWEGO

Każde ciało drgające w ośrodku sprężystym staje się źródłem energii akustycznej. Ilość tej energii wysyłanej przez źródło dźwięku w jednostce czasu, jest mocą akustyczną źródła P , której jednostką jest wat [W]

W praktyce stosuje się pojęcie poziomu natężenia dźwięku opisane zależnością:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ [dB]} \quad (1)$$

gdzie:

I – natężenie dźwięku źródła [W/m^2],
 I_0 – natężenie dźwięku odniesienia;
($I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$) [dB].

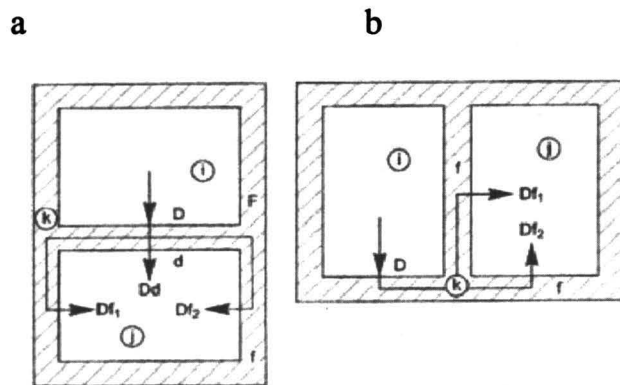
Fala akustyczna padająca na przegrodę pobudza ją do drgań, co powoduje dalsze przenoszenie dźwięku. W zależności od dróg rozprzestrzeniania się dźwięku, można je podzielić na:

- powietrzne, rozprzestrzeniające się w powietrzu,
- materiałowe (drgania i wstrząsy), rozprzestrzeniające się w konstrukcji budynku.

Szczególnym przypadkiem dźwięku materiałowego, **przenoszonego przez stropy, jest dźwięk uderzeniowy**, wywołany uderzeniem lub toceniem przedmiotów.

Dźwięki uderzeniowe, podobnie jak powietrzne, rozprzestrzeniają się drogą bezpośrednią przez strop lub drogami

pośrednimi. Schemat przenoszenia dźwięków przez przegrody budowlane, pokazano na rysunku 1[1].



Rys.1. Schemat przenoszenia dźwięków przez przegrody budowlane: a) przenoszenie dźwięków uderzeniowych – transmisja dźwięku pionowa, b) przenoszenie dźwięków uderzeniowych – transmisja dźwięku pozioma; Dd – droga bezpośrednia, Df – materiałowe drogi boczne, D – przegroda działowa w pomieszczeniu nadawczym, d – przegroda działowa po stronie odbiorczej, F – przegroda boczna w pomieszczeniu nadawczym, f – przegroda boczna w pomieszczeniu odbiorczym, i – pomieszczenie nadawcze, j – pomieszczenie odbiorcze, k – węzeł między przegrodami działową i boczną.

Fig.1. Diagram showing noise transmission through walls and ceilings: a) impact sounds – vertical transmission, b) impact sounds – horizontal transmission; Dd – direct path, Df – lateral paths in the material, D - partition structure in the transmission room d – partition structure on the receiving side, F – wall barrier, f – lateral barrier in the receiving room, i – transmission room, j – receiving room, k – node between the partition structure and lateral barrier.

Oceniając możliwości izolacyjne wybranych przegród, niejednokrotnie jest bardzo trudno szybko ocenić, które z nich są lepsze pod względem akustycznym. Prawo masy, czyli im cięższy materiał, tym lepsza akustyka, sprawdza się tylko (nie zawsze do końca) w przypadku przegród masywnych jednorodnych. W przypadku przegród warstwowych nie jest to zależność wprost proporcjonalna.

W przypadku przegrody złożonej ważne jest, aby tak dobrać materiały, aby przy zachowaniu różnej masy powierzchniowej nie dochodziło do rezonansu, który wyłączałby zdolności izolacyjne jednej z warstw. Istotnym elementem jest także sam materiał. Przykładowo styropian, jako materiał sztywniejszy nie posiada tak dobrych właściwości tłumiących jak wełna mineralna.

Innym rozwiązaniem stosowanym w ograniczeniu propagacji niekorzystnych dźwięków może być stosowanie podkładek z mat wibroizolacyjnych, **które doskonale nadają się do stropów drewnianych.**

Istotne jest, aby projektant i wykonawca podczas procesu inwestycyjnego rozpatrywał izolacyjność akustyczną, jako całość a nie analizował tylko poszczególne przegrody.

2.1. Określenie izolacyjności akustycznej przegrody

Miarą izolacyjności akustycznej przegrody, jest izolacyjność akustyczna właściwa R wyrażana wzorem (2) (pomiar laboratoryjne):

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2}, [dB] \quad (2)$$

gdzie:

W_1 – moc padająca na przegrodę po stronie nadawczej, [W],

W_2 – moc przeniesiona przez przegrodę na stronę odbiorczą, [W].

W przypadku pomiarów terenowych - bezpośrednio w budynku – izolacyjność akustyczna właściwa przybliżona R' wyrażona wzorem (3):

$$R' = 10 \lg \frac{W_1}{W_2 + W_3}, [dB] \quad (3)$$

gdzie:

W_1 – moc akustyczna padająca na przegrodę [W],

W_2 – moc akustyczna przenoszona przez przegrodę [W],

W_3 – moc akustyczna przenoszona przez elementy boczne lub inne elementy [W].

Izolacyjność akustyczna właściwa przybliżona zawsze jest niższa od R , ponieważ zawsze pomiar jest z **udziałem przenoszenia bocznego R' .**

Ograniczenie rozprzestrzeniania się dźwięków uderzeniowych w budynku wymaga zastosowania odpowiednich izolacji zmniejszających pobudzenie materiałowe konstrukcji u źródła i ograniczających rozprzestrzenianie się dźwięków materiałowych po konstrukcji. W takim przypadku konieczne jest odizolowanie powierzchni podłóg na styku ze ścianami pomieszczenia (tzw. pływające podłogi).

Podczas projektowania przegród, a zwłaszcza styku stropu ze ścianą należy zwrócić uwagę (podobnie jak przy dźwiękach powietrznych) na poprawne zaprojektowanie takiego styku ze względu na przenoszenie boczne dźwięków uderzeniowych.

Uzyskanie normowej izolacyjności stropu od dźwięków uderzeniowych zawsze wymaga zastosowania na stropach podłóg z izolacją akustyczną. Metody obliczenia podane są w normie PN-EN 12354-2, [6] oraz Instrukcji ITB nr 463/2011 [2].

Izolacyjność akustyczna od dźwięków uderzeniowych, określana jest za pomocą wartości poziomu uderzeniowego, występującego w pomieszczeniu pod stropem, w czasie pracy znormalizowanego stukacza, wytwarzającego dźwięki uderzeniowe. Im mniejsza wartość poziomu uderzeniowego, tym lepsza jest zdolność stropu do ograniczenia przenoszenia dźwięku.

Pierwszym parametrem charakteryzującym izolacyjność akustyczną stropu, jest określany w warunkach laboratoryjnych, przy braku przenoszenia bocznego, poziom uderzeniowy znormalizowany:

$$L_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0}, [dB] \quad (4)$$

gdzie:

L_i – poziom średniego ciśnienia w pomieszczeniu odbiorczym, [dB],

A – powierzchnia dźwiękochłonna w pomieszczeniu odbiorczym, [m²],

A_0 – chłonność akustyczna odniesienia, [m²].

Gdy zostanie uwzględnione przenoszenie dźwięku drogami bocznymi izolacyjność akustyczną stropu wyraża poziom uderzeniowy przybliżony znormalizowany L'_n .

Opisane parametry służą określeniu ważonego wskaźnika poziomu uderzeniowego znormalizowanego przybliżonego $L'_{n,w}$. Jest to wskaźnik, za pomocą którego opisano wymagania normowe izolacyjności akustycznej od dźwięków uderzeniowych, który oblicza się ze wzoru:

$$L'_{n,w} = L_n + K, [dB] \quad (5)$$

gdzie:

K – poprawka zależna od masy powierzchniowej stropu, wynikającej z bocznego przenoszenia dźwięku między pomieszczeniami rozdzielonymi stropem, wartości zamieszczone w [6].

3. POMIARY – WYNIKI, ANALIZA

Pomiary wykonano za pomocą miernika poziomu dźwięku DSA-50 i stukacza wzorcowego SM-1. Przykładowe wartości jednolicebnych ważonych wskaźników poziomu uderzeniowego znormalizowanego przybliżonego $L'_{n,w}$, zmierzone i obliczone dla stropu żelbetowego kanałowego przedstawiono na rys. 3, dla stropu drewnianego na rys. 4.

3.1. Opis techniczny przedmiotowych stropów

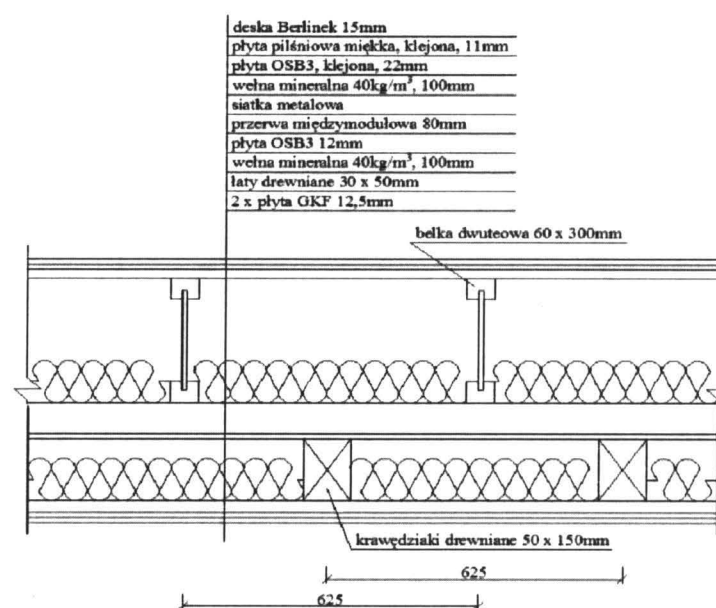
Strop żelbetowy w budynku wielorodzinnym wykonany metodą tradycyjną składał się z następujących warstw:

- płyty kanałowej żelbetowej gr. 24 cm,
- styropianu EPS 100 2 cm (kondygnacja IV/V) i bez styropianu – pozostałe stropy
- wylewki betonowa gr. 4 cm,
- warstwy wykończeniowej - panele podłogowe, w kuchni i częściowo w salonie - płytki terakotowe.

Całkowita grubość stropu wynosiła ~31 cm.

Strop w budynku drewnianym 5-cio kondygnacyjnym wykonany metodą szkieletową przedstawiono na rys. 2

Całkowita grubość stropu wyniosła 36,5cm.

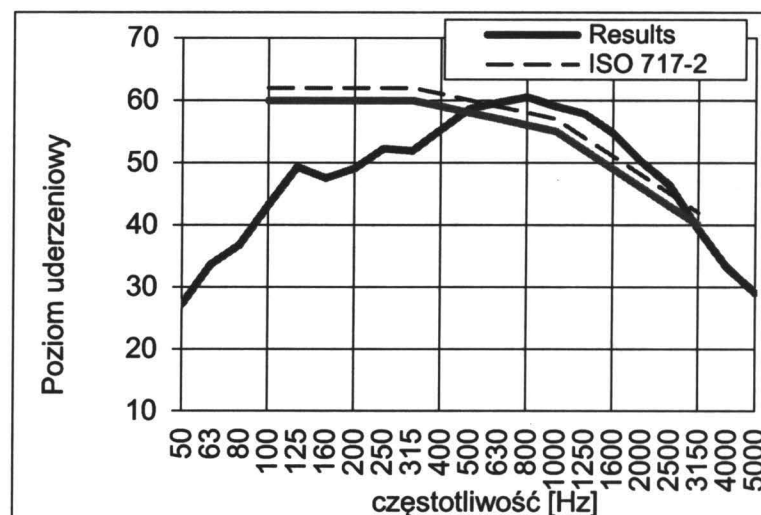


Rys. 2. Strop drewniany.

Fig.2. Wooden ceiling.

3.2. Wyniki

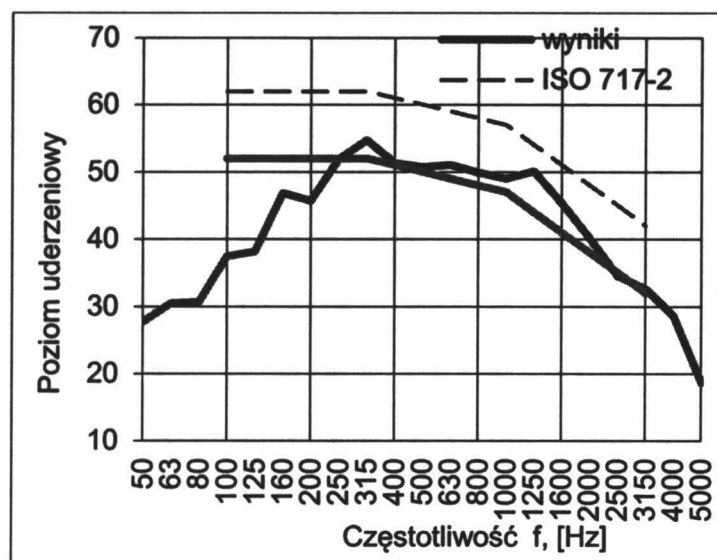
W analizowanym budynku 5-kondygnacyjnym izolacyjność akustyczna od dźwięków uderzeniowych, stropów żelbetowych między IV i V kondygnacją, nie spełniała wymagań normowych [3,5]. Wykres poniżej.



Rys.3. Wyniki pomiarów terenowych stropu żelbetowego kanałowego od dźwięków uderzeniowych $L'_{n,w}$ (C1) = 64 dB, $L'_{n,w} = 58$ dB, $L'_{n,w}$ dop - ważony wskaźnik poziomu znormalizowanego dopuszczalnego), wg PN nie spełnia wymagań.

Fig.3. On-site measurement results on impact noise reduction in hollow reinforced concrete ceiling $L'_{n,w}$ (C1) = 64 dB, $L'_{n,w} = 58$ dB ($L'_{n,w}$ dop weighted index of standardised permissible level) according to the Polish Construction Standard not meeting the requirements.

Dla stropu drewnianego równoważny poziom uderzeniowy $L'_{n,w}$, odczytany dla wartości 500 Hz z przesuniętej krzywej odniesienia, wynosi $L'_{n,w} = 50$ dB, co nie przekracza maksymalnej wartości poziomu uderzeniowego określonej w normie $L'_{n,w} \max = 58$ dB. Zgodnie z wymaganiami [3, 5] analizowany strop drewniany spełnia wymagania izolacyjności od dźwięków uderzeniowych, rys.4.



Rys.4. Wyniki pomiarów terenowych stropu drewnianego od dźwięków uderzeniowych.

Fig.4. On-site measurement results on impact noise reduction in wooden ceiling (meeting the requirements)

3.3. Analiza - stropy kanałowe (gęstożebrowe)

Popularne w Polsce stropy kanałowe są stosunkowo grube. Strop ze wszystkimi warstwami ma 25÷35 cm grubości, jednak ze względu na niewypełnione kanały, konstrukcja takich stropów jest stosunkowo lekka (<350 kg/m²). Aby tego typu konstrukcje spełniały wymagania normowe dotyczące dźwięków uderzeniowych, na wszystkich stropach międzykondygnacyjnych powinny być zastosowane podłogi pływające (przenoszenie boczne) z dodatkową izolacją akustyczną w postaci np. elastycznych płyt styropianowych o właściwościach tłumiących dźwięki o grubości co najmniej 27 mm. Niestety w Analizowanym przypadku brak było tego typu rozwiązań [7].

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów terenowych izolacyjności akustycznej stropów międzykondygnacyjnych od dźwięków uderzeniowych. Pomiary sporządzono w budynkach mieszkalnych ze stropami;

- żelbetowymi wykonanymi w technologii kanałowej,
- drewnianymi z izolacją akustyczną z wełny mineralnej

W przypadku stropów kanałowych otrzymane wartości wskaźnika izolacyjności akustycznej od dźwięków uderzeniowych w żadnym z pomieszczeń nie spełniało wymagań normowych (w przedstawionym przykładzie $L'_{n,w}(C1) = 64$ dB, $L'_{n,w \text{ dop}} = 58$ dB wg PN)

Przyczyną niespełnienia wymagań był brak izolacji akustycznej na wszystkich kondygnacjach. Wprawdzie na dwu ostatnich kondygnacjach IV/V, położono 2 cm warstwę styropianu EPS 100, który posiada słabą izolacyjność akustyczną. Do izolacji akustycznej należałoby zastosować elastyczne płyty styropianowe (np. Superakustic) Nie wykonano również pływającej podłogi.

Stropy drewniane spełniały wymagania normowe dzięki zastosowanym w nich rozwiązaniom, głównie poprzez zastosowanie 2 x 100 mm wełny mineralnej w układzie, jaki pokazano na rysunku 2.

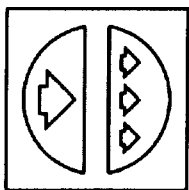
Niestety również (a może przede wszystkim) w większości przypadków jest problem z poprawnie zaprojektowaną, a następnie wykonaną izolacją akustyczną stropów drewnianych. Przedstawiony przykład jest jednym z nielicznych gdzie takie wymagania zostały spełnione.

REASONS FOR POORLY-INSTALLED ACOUSTIC INSULATION OF INTERMEDIATE FLOORS IN RESIDENTIAL BUILDINGS

Summary: The present article describes the most common reasons for poorly-installed acoustic insulation of both heavy reinforced concrete ceilings and light wooden ceilings in multi-family buildings. Not meeting the standards regarding the acoustic insulation of ceilings from airborne or impact sounds is the consequence of not taking into consideration the principles of proper planning of acoustic insulation of ceilings from noise transmission (footsteps, conversations, etc.) by designers. The article also includes the results of acoustic measurements (from technological evaluations performed by the authors) and their analysis for selected residential buildings. It also includes the current standard requirements as well as proposals for correct solutions.

Literatura

- [1] Ickiewicz I., Ickiewicz J.: Badania izolacyjności akustycznej przegród budowlanych w budownictwie drewnianym. Projekt współfinansowany ze środków UE. Politechnika Białostocka 2015.
- [2] Instrukcje, Wytyczne, Poradniki nr 448/2009. Właściwości dźwiękoizolacyjne stropów oraz zasady doboru podłóg z uwagi na izolacyjność od dźwięków uderzeniowych stropów masywnych. ITB Warszawa 2011
- [3] PN-B-02151-3:1999 Ochrona przed hałasem w budynkach – Izolacyjność akustyczna przegród w budynkach oraz izolacyjność akustyczna elementów budowlanych
- [4] PN –EN ISO 717 – 1:2013 -OBE2/A – Akustyka. Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budynku. Część 1.
- [5] PN –EN ISO 717 2/A– Akustyka. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach oraz izolacyjność od dźwięków uderzeniowych.
- [6] PN-EN 12354-2 – Akustyka budowlana. Określenie właściwości akustycznych budynku na podstawie właściwości elementów. Część 2: Izolacyjność od dźwięków uderzeniowych między pomieszczeniami.
- [7] Szudrowicz B.: Ocena izolacyjności akustycznej stosowanych w Polsce wyrobów do przegród wewnętrznych w świetle badań ITB, kwartalnik 3 (127) 2003.



UPROSZCZONA OCENA MOŻLIWOŚCI OBNIŻENIA ZAPOTRZEBOWANIA NA ENERGIĘ DO CHŁODZENIA POPRZECZ ZASTOSOWANIE OKRESOWO DZIAŁAJĄCYCH ELEMENTÓW ZACIENIAJĄCYCH

Hanna JĘDRZEJUK*, Joanna RUCIŃSKA**

** Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Instytut Techniki Ciepłej
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa, e-mail: Hanna.Jedrzejuk@itc.pw.edu.pl*

*** Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, e-mail: joanna.rucinska@is.pw.edu.pl*

Streszczenie: W artykule dokonano oceny wpływu okresowo działających elementów zacieniających na wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia. Wykazano również znaczenie wentylacji w usuwaniu nadmiernych zysków ciepła z pomieszczeń. W analizie wykorzystano uproszczoną metodę godzinową 5R1C [7]. Zamieszczono przykład, w którym przedstawiono możliwe do uzyskania obniżenie zapotrzebowania na energię i wykazano celowość takiego sposobu ograniczania zapotrzebowania na energię do chłodzenia.

Słowa kluczowe: Energia użyteczna do chłodzenia, model 5R1C, urządzenia zacieniające działające okresowo

1. WSTĘP

Stosowane obecnie technologie w budownictwie zapewniają coraz lepszą izolacyjność termiczną przegród zewnętrznych budynków. W ostatnich latach w sposób istotny zmieniły się koncepcje architektoniczne, m.in. zwiększył się udział powierzchni oszklonych w ścianach zewnętrznych. Zmieniła się także funkcja użytkowa poddaszy, które w tradycyjnych rozwiązaniach stanowiły ciepłą strefę buforową - w większości budynków jednorodzinnych poddasza są zamieszkałe, a ponadto w dachach pochylonych zazwyczaj montowane są okna.

Coraz większa szczelność budynków, w przypadku wentylacji naturalnej, skutkuje zmniejszeniem dopływu powietrza zewnętrznego do pomieszczeń.

W konsekwencji zmieniły się właściwości dynamiczne budynków oraz zwiększył się wpływ zysków ciepła, w tym zysków od promieniowania słonecznego, na parametry klimatu wewnętrznego.

Dodatkowe koszty związane z koniecznością chłodzenia w okresie letnim pomieszczeń nadmiernie przegrzanych powodują, że należy poszukiwać rozwiązań prostych, zapobiegających temu zjawisku. Stosowanie okresowo działających urządzeń zacieniających należy do tego typu działań.

2. MODEL MATEMATYCZNY

Ze względu na dynamiczny charakter procesów wymiany ciepła i masy w budynkach, do rozwiązania postawionego w tytule problemu, wybrano model uproszczony o skupionej pojemności cieplnej 5R1C [7].

Uproszczona metoda dynamiczna 5R1C pozwala na określenie w każdej godzinie wartości temperatury operacyjnej oraz wartości zapotrzebowania na energię do ogrzewania lub chłodzenia. Dlatego też ta metoda została wybrana do oceny efektywności okresowo działających urządzeń zacieniających. Efektywność określono, jako względne obniżenie zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia. Jako poziom odniesienia w każdym wariancie pojemności cieplnej budynku przyjęto wartość zapotrzebowania na energię do chłodzenia bez okresowego działających urządzeń zacieniających.

Warto podkreślić, że powszechnie stosowane do oceny energetycznej budynków metoda bilansów miesięcznych, wymaga przygotowania podobnej liczby parametrów opisujących budynek, jak metoda godzinowa bez sprzężenia cieplnego między strefami. Istotną zaletą uproszczonej metody godzinowej jest to, że obliczenia mogą być wykonane w dowolnym arkuszu kalkulacyjnym,

a wyniki lepiej opisują dynamiczny charakter procesów wymiany ciepła [1, 2].

W modelu 5R1C właściwości dynamiczne budynku opisuje wewnętrzna powierzchnia wymiany ciepła (A_m) oraz wewnętrzna pojemność cieplna (C_m). Obie te wielkości mogą być przyjmowane w zależności od pola powierzchni przestrzeni o regulowanej temperaturze (A_f). W Tab. 1 zawarto dane przyjęte do obliczeń. Podano zarówno wartości wskazane w PN-EN ISO-13790 [7], a ponadto wprowadzono dodatkową klasę budynku określoną, jako „super ciężka”.

Tabela 1. Parametry dynamiczne [7].

Table 1. Dynamic parameters [7].

Typ	Klasa budynku	Wewnętrzna powierzchnia wymiany ciepła (A_m), m ²	Wewnętrzna pojemność cieplna (C_m), J/K
A	Bardzo lekka	2,5 A_f	80 000 A_f
B	Lekka	2,5 A_f	110 000 A_f
C	Średnia	2,5 A_f	165 000 A_f
D	Ciężka	3,0 A_f	260 000 A_f
E	Bardzo ciężka	3,5 A_f	370 000 A_f
F	Super ciężka	3,5 A_f	500 000 A_f

3. UPROSZCZONA ANALIZA - PRZYKŁAD

Do analizy wybrano jednorodzinny budynek dwukondygnacyjny o powierzchni o regulowanej temperaturze 150 m², przeznaczony dla czterech osób. Budynek ma kształt prostopadłościanu. Ściany południowa i północna mają powierzchnię o 10% większą niż pozostałe. Wysokość kondygnacji netto przyjęto równą 2,70 m. Założono minimalną wartość pola powierzchni okien, tj. równą 1/8 powierzchni podłogi [3]. Wszystkie wartości izolacyjności cieplnej przegród są zgodnie z aktualnymi wymaganiami [3].

Niezbędne dane godzinowe definiujące parametry klimatu zewnętrznego przyjęto według [8], co zapewni zgodność z metodyką oceny energetycznej budynków [4].

Do analizowanego budynku doprowadzane jest powietrze o temperaturze powietrza zewnętrznego. Przyjęto trzy warianty szczelności powietrznej budynku, określonej przez krotność wymiany powietrza: 0,5 h⁻¹, 1,0 h⁻¹, 1,5 h⁻¹.

Przyjęto, że temperatura powietrza wewnętrznego w okresie ogrzewczym wynosi 20°C [3, 6], natomiast w okresie letnim 26°C [5]. Jednostkowe wewnętrzne zyski ciepła przedstawiono w Tab. 2.

Uwzględniono włączanie oświetlenia wyłącznie wtedy, gdy w budynku przebywają ludzie (zgodnie ze schematem użytkowania) oraz jeżeli wartość całkowitego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą jest mniejsza od wartości granicznej 70 W m⁻². W wyniku tak przyjętych założeń, wartości średniego obciążenia

ciepłego pomieszczeń wewnętrznymi zyskami ciepła wyniosła 4,3 W m⁻². (6,8 W/m² wg [4]).

Tabela 2. Jednostkowe wewnętrzne zyski ciepła.

Table 2. Internal heat gains.

Źródło	Jednostkowe zyski ciepła
	W/j.o.
od ludzi, W/os.	55
od oświetlenia, W/m ²	4
od urządzeń elektrycznych, W/m ²	3

We wszystkich przypadkach przeprowadzono obliczenia porównawcze, w których nie uwzględniono wewnętrznych zysków ciepła.

Przewidziano możliwość obniżenia zysków ciepła od promieniowania słonecznego poprzez zastosowanie okresowo działających elementów zacinających, wówczas, gdy wartość średniego godzinowego napromieniowania słonecznego przekracza: 200 Wh m⁻², 300 Wh m⁻². Przyjęto efektywność zacinania przez okresowo działające elementy zacinające: 40%.

Dla każdej klasy wewnętrznej pojemności cieplnej budynków przeprowadzono wariantowe obliczenia, których wyniki zamieszczono w tabelach 3 - 8.

W tabelach tych w nawiasach podano wartości wskaźników rocznego zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia w budynku przy braku wewnętrznych zysków ciepła.

Wartości wyrażone w procentach odnoszą wybraną wartość wskaźnika rocznego zapotrzebowania na energię do chłodzenia do analogicznej wartości określonej dla wariantu bez elementów zacinających działających okresowo przy liczbie wymian powietrza 0,5 h⁻¹. Wartości referencyjne zostały wyróżnione pogrubioną czcionką.

Tabela 3. Wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia w budynku o konstrukcji bardzo lekkiej (A), kWh m⁻² rok⁻¹.Table 3. Useful energy demand for cooling in the very light building (A), kWh m⁻² rok⁻¹.

Program działania elementów zacinających	Liczba wymian powietrza		
	0,5 h ⁻¹	1,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
[-]	0,5 h ⁻¹	1,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
Bez elementów zacinających	15,51 (7,61) 100%	9,43 (4,55) 60,8%	6,46 (3,26) 41,7%
Elementy zacinające: od 300 Wh m ⁻²	10,10 (4,03) 65,1%	5,87 (2,49) 37,8%	4,09 (1,87) 15,0%
Elementy zacinające: od 200 Wh m ⁻²	6,01 (1,81) 38,7%	3,38 (1,13) 21,8%	2,33 (0,09) 15,0%

Tabela 4. Wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia w budynku o konstrukcji lekkiej (B), kWh m⁻² rok⁻¹.

Table 4. Useful energy demand for cooling in the light building (B), kWh m⁻² rok⁻¹.

Program działania elem. zacien.	Liczba wymian powietrza		
	0,5 h ⁻¹	1,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
[-]			
Bez elementów zacieniających	15,24 (7,20) 100%	8,88 (3,96) 58,3%	5,74 (2,64) 37,7%
Elementy zacieniające: od 300 Wh m ⁻²	9,74 (3,64) 63,9%	5,37 (2,07) 35,2%	3,54 (1,46) 23,2%
Elementy zacieniające: od 200 Wh m ⁻²	5,68 (1,53) 37,3%	2,99 (0,87) 19,6%	1,95 (0,63) 12,8%

Tabela 5. Wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia w budynku o konstrukcji średniej (C), kWh m⁻² rok⁻¹.

Table 5. Useful energy demand for cooling in the medium building (C), kWh m⁻² rok⁻¹.

Program działania elem. zacien.	Liczba wymian powietrza		
	0,5 h ⁻¹	1,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
[-]			
Bez elementów zacieniających	14,97 (6,75) 100%	8,28 (3,36) 55,3%	4,98 (2,04) 33,3%
Elementy zacieniające: od 300 Wh m ⁻²	9,38 (3,19) 62,7%	4,80 (1,61) 32,1%	2,92 (1,04) 19,5%
Elementy zacieniające: od 200 Wh m ⁻²	5,29 (1,20) 35,3%	2,53 (0,57) 16,9%	1,52 (0,35) 10,2%

Tabela 6. Wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia w budynku o konstrukcji ciężkiej (D), kWh m⁻² rok⁻¹.

Table 6. Useful energy demand for cooling in the heavy building (D), kWh m⁻² rok⁻¹.

Program działania elem. zacien.	Liczba wymian powietrza		
	0,5 h ⁻¹	1,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
[-]			
Bez elementów zacieniających	14,56 (6,25) 100%	7,63 (2,77) 52,4%	4,24 (1,51) 29,1%
Elementy zacieniające: od 300 Wh m ⁻²	8,95 (2,64) 61,5%	4,15 (1,16) 28,5%	2,3 (0,65) 15,8%
Elementy zacieniające: od 200 Wh m ⁻²	4,87 (0,82) 33,4%	2,00 (0,29) 13,7%	1,06 (0,16) 7,3%

Tabela 7. Wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia w budynku o konstrukcji bardzo ciężkiej (E), kWh m⁻² rok⁻¹.

Table 7. Useful energy demand for cooling in the very heavy building (E), kWh m⁻² rok⁻¹.

Program działania elem. zacien.	Liczba wymian powietrza		
	0,5 h ⁻¹	1,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
[-]			
Bez elementów zacieniających	14,2 (5,89) 100%	7,18 (2,31) 50,6%	3,68 (1,13) 25,9%
Elementy zacieniające: od 300 Wh m ⁻²	8,62 (2,21) 60,7%	3,63 (0,82) 25,6%	1,82 (0,41) 12,8%
Elementy zacieniające: od 200 Wh m ⁻²	4,53 (0,54) 30,5%	1,57 (0,15) 8,6%	0,71 (0,07) 3,2%

Tabela 8. Wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia w budynku o konstrukcji super ciężkiej (F), kWh m⁻² rok⁻¹.

Table 8. Useful energy demand for cooling in the ultra-heavy building (F), kWh m⁻² rok⁻¹.

Program działania elem. zacien.	Liczba wymian powietrza		
	0,5 h ⁻¹	1,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
[-]			
Bez elementów zacieniających	13,88 (5,57) 100%	6,81 (1,89) 49,1%	3,17 (0,82) 22,8%
Elementy zacieniające: od 300 Wh m ⁻²	8,33 (1,83) 60,0%	3,17 (0,55) 22,8%	1,4 (0,24) 10,1%
Elementy zacieniające: od 200 Wh m ⁻²	4,24 (0,33) 30,5%	1,19 (0,06) 8,6%	0,45 (0,02) 3,2%

4. PODSUMOWANIE

1. Przeprowadzona analiza jest uproszczona, nie tylko ze względu na zastosowany model matematyczny 5R1C. Pominięte zostało ważny aspekt - zapewnienie odpowiedniej dostępności światła naturalnego w pomieszczeniach wewnętrznych. Wprowadzenie granicznej wartości średniego godzinowego napromieniowania słonecznego (w przykładzie 300 Wh m⁻² lub 200 Wh m⁻²), przy której następuje uaktywnienie okresowo działających elementów zacieniających, powinno być poprzedzone dokładniejszą analizą.

Innym uproszczeniem jest pominięcie w analizie energetycznej energii niezbędnej do napędu elementów okresowo zacieniających. W końcowej analizie efektów należy również uwzględnić rachunek ekonomiczny.

Uzyskane wyniki zależą od przyjętych parametrów klimatu zewnętrznego.

2. Warunki zadania zostały tak przyjęte (tj. powierzchnia okien, współczynnik efektywności elementów okresowo zacieniających, średnie obciążenie cieplne pomieszczeń wewnętrznymi zyskami ciepła), aby możliwe do uzyskania efekty zmniejszenia zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia w obiektach rzeczywistych nie były gorsze od prezentowanych w artykule.

3. W polskich warunkach klimatycznych budynki o większej wewnętrznej pojemności cieplnej charakteryzują się niższym zapotrzebowaniem na energię użyteczną do chłodzenia.

Największe względne zmiany wartości zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia występują w przypadku budynku o największej pojemności cieplnej.

4. W okresie letnim odpowiedni strumień powietrza wentylacyjnego zapewnia usuwanie nadmiernych zysków ciepła. W przebadanym zakresie najniższe wartości wskaźnika rocznego zapotrzebowania na energię użyteczną do chłodzenia uzyskano dla liczby wymian powietrza $1,5 \text{ h}^{-1}$. Zalecana strategia przewietrzania budynków powinna być weryfikowana zależnie od temperatury powietrza zewnętrznego.

5. Wewnętrzne zyski ciepła mają istotny wpływ na zapotrzebowanie na energię do chłodzenia.

6. Na zapotrzebowanie na energię do chłodzenia, a pośrednio na parametry klimatu wewnętrznego oraz ochronę przed nadmiernym przegrzewaniem budynków, mają wpływ: wewnętrzna pojemność cieplna (konstrukcja budynku), wewnętrzne zyski ciepła (przeznaczenie, sposób eksploatacji), strumień powietrza wentylacyjnego.

Natomiast rzeczowe zapisy w obowiązującym rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [3], są bardzo uproszczone i dotyczą:

- izolacyjności termicznej przegród budowlanych,
- pola powierzchni okien oraz przegród szklanych i przezroczystych o współczynniku przenikania ciepła nie mniejszym niż $0,9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$,
- współczynnika przepuszczalności energii całkowitej promieniowania słonecznego okien oraz przegród szklanych i przezroczystych.

Co prawda trochę inaczej jest w przypadku obecności instalacji chłodzenia. Wtedy bowiem ograniczenie maksymalnej wartości wskaźnika rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania, wentylacji, chłodzenia, przygotowania ciepłej wody użytkowej oraz oświetlenia powoduje konieczność odpowiedniego zaprojektowania budynku oraz instalacji wewnętrznych [3].

Niemniej jednak wymagania prawne w zakresie ochrony przed nadmiernym przegrzewaniem pomieszczeń, i bezpośrednio z tym zagadnieniem związane - warunki

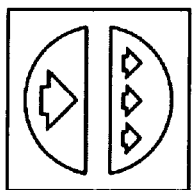
dostępności światła naturalnego, powinny doczekać się bardziej precyzyjnych zapisów.

SIMPLIFIED EVALUATION OF OPPORTUNITIES TO REDUCE ENERGY DEMAND FOR COOLING THROUGH THE USE PERIODICALLY ACTIVE SHADING ELEMENTS

Summary: This paper presents the impact of periodically acting shading elements on the rate of useful energy demand for cooling. It was also demonstrated the importance of ventilation rate in decreasing of the influence of the heat gains on the energy demand. This analysis uses a simplified a hourly method 5R1C [7]. The example is given to present possibilities to reduce the energy demand.

Literatura

- [1] Narowski P. *Podstawy uproszczonej metody godzinowej obliczania ilości ciepła do ogrzewania i chłodzenia budynków*, Energia i Budynek 5 (15) 2008
- [2] Narowski P. *Uproszczona metoda godzinowa obliczania ilości ciepła do ogrzewania i chłodzenia budynków*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, Nr 1 (466) 2009,
- [3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 z późniejszymi zmianami
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej, Dz.U. 2015 nr 0 poz. 376
- [5] PN-B-03421:1978 Wentylacja i klimatyzacja - Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi
- [6] PN-EN 12831:2006 Instalacje ogrzewcze w budynkach - Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego
- [7] PN-EN ISO 13790:2009 Energetyczne właściwości użytkowe budynków - Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia
- [8] Typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski do obliczeń energetycznych budynków (http://www.mir.gov.pl/budownictwo/rynek_budowlany_i_teknika/efektywnosc_energetyczna_budynkow/typowe_lata_meteorologiczne/stroony/start.aspx)



WYKORZYSTANIE BADAŃ MODELOWYCH W PRZYBLIŻONEJ OCENIE STRUMIENIA CIEPŁA JAWNEGO Z POWIERZCHNI ZABUDOWANEJ

Katarzyna KLEMM*

** Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Zakład Gospodarki Przestrzennej i Geomatyki
al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiona została propozycja oceny wielkości strumienia ciepła jawnego z powierzchni zabudowanej. Badania prowadzone były w tunelu aerodynamicznym przy przyjętych skalach podobieństwa $K_L = 100$, $K_U = 2$, $K_{Tx} = 8$ i $K_t = 50$. Turbulencyjny przepływ strumienia powietrza nad wymodelowanym obszarem zabudowy był rejestrowany przy wykorzystaniu wiązki światła laserowego. Określenie współczynnika struktury optycznej C_n^2 pozwoliło ustalić wielkość współczynnika struktury termicznej C_T^2 . Przyjmując profil prędkości wiatru o charakterze logarytmicznym wyznaczono wartość prędkości tarciowej, a w dalszej kolejności funkcji Monina - Obuchowa $f_T \left(\frac{z}{z_L} \right)$.

Na podstawie uzyskanych danych oszacowano skalę temperatury T_x i wielkość strumienia ciepła jawnego Q_H .

Słowa kluczowe: Badania modelowe, emisja ciepła, zabudowa, laser.

1. WPROWADZENIE

Zabudowa miejska odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu klimatu lokalnego. Stanowi jedno z głównych źródeł antropogenicznych gazów cieplarnianych oraz ciepła. W ostatnich latach zwrócono szczególną uwagę na problemy związane z niekorzystnym oddziaływaniem miejskiej wyspy ciepła na zdrowie mieszkańców miast, jak również na straty energii związane z chłodzeniem obiektów. Odzwierciedleniem tych zainteresowań są liczne inicjatywy podejmowane przez kraje członkowskie UE mające na celu wypracowanie skutecznych metod przeciwdziałania i łagodzenia skutków miejskiej wyspy ciepła. Przykładem takich działań może być Program dla Europy Środkowej „Development and application of mitigation and adaptation strategies and measures for counteracting the global Urban Heat Islands phenomenon,” skupiający naukowców z

sześciu państw europejskich, w tym Polski. Jednym z celów programu jest opracowanie metod badawczych służących ocenie istniejących warunków mikroklimatu, jak również skuteczności zastosowanych rozwiązań. Wśród realizatorów programu znaleźli się między innymi urbaniści, meteorolodzy oraz specjaliści z zakresu fizyki budowli.

Istotne znaczenie dla zrozumienia specyficznych cech mikroklimatu w określonych układach zabudowy ma znajomość bilansu cieplnego, w tym turbulentnych strumieni ciepła jawnego. Pomimo istotnej roli bilansu cieplnego w kształtowaniu mikroklimatu istnieje stosunkowo niewiele danych pomiarowych pozwalających na zrozumienie stosunków cieplnych w mieście, czy na weryfikację istniejących modeli numerycznych. Najczęściej stosowanymi metodami pomiaru turbulentnych strumieni ciepła są metoda gradientowa, metoda kowariancji wirów, czy metoda scyntylacyjna. Metoda scyntylacyjna polega na pomiarach fluktuacji natężenia promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez nadajnik i odbieranego przez odbiornik. Odległość między przyrządami waha się od kilkudziesięciu metrów do kilku kilometrów. Podczas przejścia przez atmosferę fale elektromagnetyczne podlegają wielu procesom powodującym zmianę ich natężenia, polaryzacji i fazy. Wiry turbulentne wywołane emisją ciepła z powierzchni zabudowanej powodują fluktuacje współczynnika załamania na drodze przemieszczającej się fali i w konsekwencji fluktuacje natężenia promieniowania dochodzącego do odbiornika [4]. Z uwagi na wysokie koszty systemu pomiarowego oraz słabą znajomość metodyki pomiarowej metody te są rzadko stosowane. Jak wykazują pierwsze próby alternatywnym rozwiązaniem może stać się wykorzystanie metody laserowej w badaniach modelowych [5],[6],[7]. Zaletą tego typu badań jest

możliwość szybkiej analizy dowolnych układów budynków przy uwzględnieniu napływu powietrza z różnych kierunków.

2. PROFILE PRĘDKOŚCI WIATRU

Zależność prędkości wiatru od wysokości przedstawiana jest zazwyczaj za pomocą wzoru potęgowego lub logarytmicznego. W warstwie przyziemnej do wysokości rzędu 100÷200m dobrą zgodność z warunkami rzeczywistymi wykazuje wzór logarytmiczny uwzględniający tarcie wywołane szorstkością podłoża.

$$\bar{U}(z) = \frac{u_x}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad (1)$$

gdzie:

κ - stała von Kármána (0,4),

u_x - prędkość tarciaowa $\left(\sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \right)$ [m/s]

τ_o - powierzchniowe naprężenie ścinające [N/m²],

ρ - gęstość powietrza [kg/m³],

z_o - współczynnik szorstkości (zwany również parametrem chropowatości czy wysokością chropowatości) [m].

W celu wyeliminowania wpływu pojedynczych przeszkód na przepływ powietrza równanie powyższe może być stosowane w odległości $z > 20z_o$ od powierzchni gruntu. Według Panofskiego wzór logarytmiczny może być wykorzystywany do wysokości 150 m nad lądem, bez utraty dokładności [8]. W odniesieniu do obszarów zabudowanych lub zalesionych stosuje się zmodyfikowaną postać wzoru logarytmicznego [11], w której wysokość z zastąpiona jest przez wysokość efektywną ($z-z_d$). Wysokość z_d , zwana przemieszczeniem płaszczyzny zerowej, przyjmuje zwykle wartość równą 0,6 – 0,8 wysokości elementów zakłócających (budynki, zieleń).

Zakładając, że prędkość wiatru gradientowego U_G jest stała (na dystansie 10 – 100 km), można powiązać ze sobą profile prędkości dwóch terenów. Według Simiu [12] istnieje prosta zależność:

$$\frac{u_x}{u_{x1}} = \left(\frac{z_o}{z_{o1}} \right)^{0,0706} \quad (2)$$

Nawet przy umiarkowanych prędkościach wiatru, gdy z przekracza kilkadziesiąt metrów, mogą pojawić się odchylenia od profilu logarytmicznego. Są one spowodowane ruchem pionowym powietrza, wywołanym zmianami termicznymi. Gdy powierzchnia gruntu ulega w nocy ochłodzeniu, następuje osłabienie ruchu turbulencyjnego powietrza, co wyraża się gwałtownym wzrostem profilu prędkości z wysokością. Natomiast ogrzanie powierzchni w ciągu dnia nasila turbulencję i wywołuje stały wzrost profilu prędkości z wysokością.

$$\bar{U}(z) = \frac{u_x}{\kappa} \left(\ln \frac{z-z_d}{z_o} - \psi \left(\frac{z}{z_L} \right) \right) \quad (3)$$

dla $z > 20z_o + z_d$

gdzie:

z – wysokość [m],

z_o - współczynnik szorstkości [m],

z_d - przemieszczenie płaszczyzny zerowej [m],

z_L - długość Monina - Obuchowa [m],

κ - stała Kármána 0,4,

u_x - prędkość tarciaowa [m/s],

ψ - poprawka stabilności termicznej (funkcja Monina - Obuchowa).

Wpływ powierzchniowych strumieni ciepła jest bardzo istotny. W warstwie powierzchniowej z/z_L jest parametrem stabilności, gdzie z_L - długość Monina - Obuchowa jest zależna od [9]:

$$z_L = \frac{\rho T c_p u_x^3}{\kappa g H_o} \quad (4)$$

gdzie:

c_p - ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu [J/K·kg],

T - temperatura powietrza [K],

g - przyspieszenie ziemskie [m/s²],

ρ - gęstość powietrza [kg/m³],

H_o - strumień ciepła [W/m²].

Parametr z/z_L przedstawia stosunek między termicznym i mechanicznym wpływem na turbulencję. Warstwa graniczna jest w przybliżeniu obojętna, gdy mechaniczny wpływ przeważa, a $|z/z_L| \ll 1$.

W warunkach nieoptymalnych istotna staje się poprawka $\psi(z/z_L)$

W przypadku stałej równowagi atmosfery [2]

$$\psi \left(\frac{z}{z_L} \right) = -5 \frac{z}{z_L}, \quad z/z_L > 0 \quad (5)$$

W warunkach równowagi chwiejnej [Petersen 1984] 1980]

$$\psi \left(\frac{z}{z_L} \right) = \left(1 - 16 \frac{z}{z_L} \right)^{1/4} - 1, \quad z/z_L < 0$$

3. FLUKTUACJE TURBULENCYJNEGO PRZEPŁYWU POWIETRZA

W obszarach miejskich znaczny udział powierzchni sztucznych o niskim albedo przyczynia się do wzrostu turbulencji termicznej i temperatury powietrza. Z punktu widzenia kształtowania korzystnych warunków mikroklimatu wskazany jest zwiększony udział powierzchni naturalnych charakteryzujących się wysokimi wartościami albedo. Dzięki zastosowaniu zieleni możliwe staje się wzbudzanie lokalnych ruchów powietrza oraz

niwelowanie nadwyżek w bilansie cieplnym obszarów zabudowanych.

Fluktuacje turbulentnego przepływu powietrza charakteryzuje współczynnik struktury optycznej C_n^2 , który jest powiązany z parametrem struktury temperatury C_T^2 .

$$C_n^2 = \left[\frac{79P}{T^2} \cdot 10^{-6} \right]^2 \cdot C_T^2 \quad (6)$$

gdzie:

P - ciśnienie [hPa],

T - temperatura [K],

C_T - współczynnik struktury temperatury [$K \cdot m^{-1/3}$].

Dysponując parametrem struktury temperatury C_T^2 można wyznaczyć turbulentny strumień ciepła jawnego Q_H . Teoria podobieństwa Monina – Obuchowa wiąże parametr C_T^2 , określony w warstwie powierzchniowej (na wysokości efektywnej z_{ef}) ze strumieniem ciepła jawnego [13].

$$C_T^2(z_{ef})^{2/3} \cdot T_x^{-2} = f_T\left(\frac{z_{ef}}{z_L}\right) \quad (7)$$

gdzie:

z_{ef} - efektywna wysokość ścieżki pomiarowej,

T_x - skala temperatury

$f_T\left(\frac{z_{ef}}{z_L}\right)$ - funkcja podobieństwa teorii Monina - Obuchowa

Funkcja $f_T\left(\frac{z_{ef}}{z_L}\right)$ dla stałych warunków pogodowych może być przyjęta w postaci

$$f_T\left(\frac{z_{ef}}{z_L}\right) = 4 \left[1 + 7 \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right) + 20 \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right)^2 \right]^{1/3}, \frac{z}{z_L} > 0 \quad (8)$$

a dla warunków chwiejnych

$$f_T\left(\frac{z_{ef}}{z_L}\right) = 4 \left[1 - 7 \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right) + 75 \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right)^2 \right]^{-1/3}, \frac{z}{z_L} < 0$$

Długość z_L wyznacza się z zależności:

$$z_L = 0,29 u_x^2 \frac{T}{T_x} \quad (9)$$

gdzie:

u_x - prędkość tarciova

T_x - skala temperatury

T - temperatura powietrza

Ponieważ u_x i T_x są ze sobą powiązane poprzez długość Obuchova z_L , to układ równań (7); (8) i (9) należy rozwiązać iteracyjnie. W efekcie dysponując parametrami u_x i T_x obliczonymi numerycznie, możemy oszacować bezwzględne wartości strumienia ciepła jawnego

$$Q_H = \rho c_p \cdot u_x \cdot T_x$$

4. PARAMETRY AERODYNAMICZNE PODŁOŻA W OBSZARACH ZABUDOWANYCH

Przyjęcie efektywnej wysokości pomiarów z_{ef} w obszarach zurbanizowanych wiąże się z pewnymi trudnościami. Decyduje o tym niejednorodna powierzchnia i zróżnicowana wysokość zabudowy. W literaturze możemy spotkać różne propozycje wyznaczania uśrednionych parametrów aerodynamicznych podłoża, takich jak współczynnik szorstkości – z_o czy wysokość przesunięcia zerowego z_d . O ile oszacowanie wysokości zabudowy nie stanowi większego problemu, to poprawne oszacowanie z_o i z_d jest bardziej złożone i w zasadniczy sposób wpływa na wartość z_{ef}

W pracy przyjęto metodę określania współczynnika z_o wg [1]

$$z_o = (h - z_d) \exp \left[- \frac{\kappa}{\sqrt{0,5 \cdot C_{Dh} \cdot \lambda_F}} \right] \quad (10)$$

gdzie:

h - średnia wysokość budynków,

κ - stała von Kármána (0,4),

C_{Dh} - współczynnik oporu pojedynczej przeszkody (0,8),

λ_F - gęstość powierzchni czołowej.

$$\lambda_F = \sum_{i=1}^n A_{Fi} / A_T \quad (11)$$

A_F – powierzchnia czołowa poszczególnych budynków,

A_T – całkowita powierzchnia rozpatrywanego obszaru zabudowy,

z_d - przemieszczenie płaszczyzny zerowej [m].

Zależność na określenie przemieszczenia płaszczyzny zerowej dla regularnej grupy budynków przyjęto wg. [1]:

$$z_d = h(\lambda_p)^{0,6} \quad (12)$$

gdzie:

λ_p - wskaźnik gęstości zabudowy,

h - średnia wysokość budynków

Wskaźnik $\lambda_p = A_p / A_T$, gdzie A_T jest ogólną powierzchnią rozpatrywanego obszaru zabudowy a A_p jest sumą powierzchni budynków A_{pi} $i=1,2,3..n$ znajdujących się na powierzchni A_T .

Średnią wysokość budynków określamy ze wzoru:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n V_i h_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (13)$$

gdzie:

V_i - kubatura budynków

h_i - wysokość budynków

5. PODSTAWOWE PARAMETRY TURBULENCJI I METODA ICH WYZNACZANIA

Parametrem często stosowanym w opisie turbulencji jest parametr struktury optycznej, który jest miarą amplitudy fluktuacji współczynnika załamania n i skali wewnętrznej l_o , będącej skalą, w której energia kinetyczna turbulencji ulega dyssypacji.

Standardowe metody pomiaru wewnętrznej skali turbulencji bazują na scyntylacji laserowej, która jest wielkością związaną z amplitudą. Metody te mają zastosowanie w przypadku ścieżek o długości powyżej 100m.

W przypadku krótkich ścieżek światła laserowego stosowane są metody oparte na wielkościach związanych z fazą. Przydatność ich została potwierdzona w pracach [3],[5],[6],[7], gdzie podkreślono wykorzystanie fluktuacji bocznych wąskiej wiązki laserowej.

W pracy proponuje się wprowadzenie do rozważań kąt wychylenia wiązki θ . Składową poziomą i pionową kąta wychylenia θ_1 i θ_2 uzyskujemy, jako pochodną fazowej funkcji strukturalnej, stąd kwadrat średniego kąta wychylenia może być przedstawiony, jako zależność

$$\langle \theta_{x1} \rangle^2 = \langle \theta_{x2} \rangle^2 = 1,10 C_n^2 L l_o^{-1/3} \quad (14)$$

a średnią kwadratową fluktuacji kąta wychylenia wiązki laserowej σ_θ^2 zapiszemy w postaci

$$\sigma_\theta^2 = 8,2 \cdot 10^{-8} C_n^2 L^3 l_o^{-7/3} \quad (15)$$

gdzie:

$$\sigma_\theta^2 = \langle \theta^2 \rangle - \langle \theta \rangle^2$$

Wyrażenie na skalę wewnętrzną l_o w obrębie optyki geometrycznej $l_o^2 \geq \lambda L$ zapiszemy

$$l_o = 0,273 \cdot 10^{-3} L \sqrt{\frac{\langle \theta_1 \rangle^2}{\sigma_\theta^2}} \quad (16)$$

W przypadku, kiedy długość ścieżki L zawiera się w przedziale $l_o^2/\lambda < L \leq l_o^4/\lambda^3$, to wyrażenie na kwadrat średniego kąta wychylenia i średnia kwadratowa fluktuacji kąta wychylenia ma postać

$$\begin{aligned} \langle \theta_1 \rangle^2 &= \langle \theta_2 \rangle^2 = 0,60 C_n^2 L l_o^{-1/3} \\ \sigma_\theta^2 &= 5,2 \cdot 10^{-9} C_n^2 L^{-11/6} k_\lambda^{7/6} \end{aligned} \quad (17)$$

Wyrażenie na skalę wewnętrzną ma postać

$$l_o = 1,5 \cdot 10^{24} k_\lambda^{-7/2} L^{-5/2} \left[\frac{\sigma_\theta^2}{\langle \theta_1 \rangle^2} \right]^3 \quad (18)$$

Równania wiążące skalę wewnętrzną l_o z wielkościami szybkości dyssypacji możemy przedstawić w postaci

$$\varepsilon = \frac{7,4^4 v_t^3}{l_o^4} \quad (19)$$

gdzie:

v_t - turbulentna lepkość kinematyczna [m^2/s],

ε - szybkość dyssypacji energii kinetycznej turbulencji [m^2/s^3].

6. PRZYBLIŻONA OCENA STRUMIENIA CIEPŁA JAWNEGO DLA OBSZARU ZABUDOWANEGO PRZY WYKORZYSTANIU BADAŃ MODELOWYCH

Korzystając z teorii podobieństwa przepływów ustalone zostały istotne dla przyjętego eksperymentu podobieństwa częściowe. Zapewnienie całkowitego podobieństwa w przepływach o niestalonym charakterze jest niemożliwe do spełnienia.

W tej sytuacji zdecydowano się na podobieństwo częściowe, przyjmując kryterium podobieństwa zjawisk okresowych oraz warunek podobieństwa wynikającego z równania na energię kinetyczną turbulencji, przy uwzględnieniu członu związanego z produkcją energii kinetycznej turbulencji.

Powyższe warunki podobieństwa mają postać

$$\frac{K_l}{K_t K_U} = 1 \quad \text{oraz} \quad \frac{K_{Gb}}{K_\rho} \cdot \frac{K_t}{K_U^2} = 1 \quad (20)$$

Należy, zatem spełnić warunki podobieństwa w postaci liczb kryterialnych

$$H_o = \frac{l}{U t} \quad \text{oraz} \quad G_{kl} = \frac{g \beta v T_x t}{U^2 l} \quad (21)$$

W dalszej części zostaną przedstawione przykłady badań modelowych przy zastosowaniu wiązki światła laserowego zachowując przedstawione powyżej kryteria podobieństwa. Badania zostały przeprowadzone przy temperaturze $T = 292K$ przyjmując skale: geometryczną, prędkości, czasu i gradient temperatury na poziomie $K_L = 100$, $K_U = 2$, $K_t = 50$, $K_{Tx} = 8$.

Równocześnie założono, że przyspieszenie ziemskie g , współczynnik lepkości kinetycznej ν oraz współczynnik rozszerzalności β w badaniu modelowym, jak i w skali rzeczywistej są równe. Profil prędkości przyjęto, jako logarytmiczny, prędkość na wysokości $z = 0,10m$ kształtowała się na poziomie $U_{z=0,10} = 1,49m/s$ przy szorstkości powierzchni $z_o \cong 0,0002m$.

Wywołanie efektu turbulencji termicznej w badaniu modelowym nastąpiło w wyniku odpływu strumienia ciepła z powierzchni podłoża na poziomie $8W/m^2$.

Przyjęty poziom gęstości strumienia ciepła miał modelować wielkość natężenia promieniowania słonecznego w skali rzeczywistej na poziomie $R_{sr} = 252W/m^2$.

Obserwacje fluktuacji gęstości strumienia powietrza prowadzono na wysokości $z = 0,10\text{m}$ wykorzystując układ elektro – optyczny.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów kąta wychylenia wiązki światła laserowego oraz jego fluktuacji możliwe było wyznaczenie współczynnika struktury optycznej C_n^2 .

Kolejnym krokiem było określenie współczynnika struktury termicznej C_T^2 .

Na podstawie zależności (6) można stwierdzić, że przy współczynniku struktury optycznej na poziomie

$$C_n^2 = 0,134 \cdot 10^{-12}$$

Współczynnik struktury termicznej osiąga wielkość $C_T^2 = 0,156$

Zakładając logarytmiczny profil prędkości i przyjmując wcześniej podane dane $z_o = 0,0002\text{m}$, $U_{z=0,10} = 1,49\text{m/s}$ otrzymujemy prędkość tarciovą na poziomie $u_x \approx 0,096\text{m/s}$. Długość Monina - Obuchova z_L zgodnie z zależnością (9) zapiszemy

$$z_L = 0,29 \cdot 0,096^2 \cdot \frac{292}{T_x}$$

a parametr z/z_L możemy zapisać

$$z/z_L = \frac{0,10}{0,29 \cdot 0,096^2 \cdot \frac{292}{T_x}} = 0,13T_x$$

Funkcję $f_T(z/z_L)$ dla warunków chwiejnych zapiszemy:

$$f\left(\frac{z}{z_L}\right) = 4[1 - 7(0,13T_x) + (0,13T_x)^2]^{-1/3}$$

Równanie (7) możemy przedstawić w postaci:

$$0,0186T_x^{-2} = 4[1 - 7(0,13T_x) + (0,13T_x)^2]^{-1/3}$$

stąd skala temperatury $T_x = 0,069\text{K}$

Dysponując parametrami u_x i T_x możemy oszacować wielkość strumienia ciepła jawnego

$$Q_H = 1210,5 \cdot 0,069 \cdot 0,096 = 8,0\text{W/m}^2$$

Przedstawiony powyżej przykład dotyczył prostego wariantu. Interesujący jest przypadek, w którym mamy do czynienia z obszarem zabudowanym.

Podstawowe parametry aerodynamiczne podłoża określono korzystając z zależności dla z_o i z_d wg. [1].

Wyznaczono wskaźnik gęstości zabudowy $\lambda_p = 0,10$, a uśredniona wysokość obiektów $h = 0,12\text{m}$. Korzystając ze wzoru (12) określono wysokość przemieszczenia płaszczyzny zerowej $z_d = 0,03\text{m}$.

Współczynnik szorstkości z_o dla rozpatrywanego obszaru wyznaczono korzystając z zależności (10) i uzyskano wielkość $z_o = 0,015\text{m}$

Wskaźnik gęstości pola napływu dla rozważanego kierunku napływu wiatru (obszar zabudowany) $\lambda_F = 0,12$

Założono, że napływ wiatru ma miejsce od strony terenu płaskiego niezabudowanego, gdzie prędkość na poziomie $z = 0,10\text{m}$ osiąga wartość $U_{z=0,10} = 1,49\text{m/s}$, zaś na $z = 0,35\text{m}$, $U_{z=0,35} = 1,75\text{m/s}$, natomiast prędkość tarciovą $u_x = 0,096\text{m/s}$.

Korzystając z zależności [12] wiążącej ze sobą profile prędkości dwóch terenów wynika, że prędkość tarciovą w terenie zabudowanym może być szacowana na poziomie $u_x = 0,13\text{m/s}$.

Długość Monina – Obuchova zapiszemy w postaci:

$$z_L = 0,29 \cdot 0,13^2 \cdot \frac{292}{T_x} = \frac{1,43}{T_x}$$

a parametr

$$z/z_L = 0,35 \left(\frac{1,43}{T_x} \right)^{-1} = 0,24T_x$$

Ostatecznie równanie (7) zapiszemy w postaci

$$0,049 \cdot 0,35^{2/3} T_x^{-2} = 4[1 - 7(0,24 \cdot T_x) + 75(0,24 \cdot T_x)^2]^{-1/3}$$

Rozwiązaniem równania jest skala temperatury na poziomie $T_x = 0,059\text{K}$

Znając prędkość tarciovą u_x i skalę temperatury T_x możemy oszacować wielkość strumienia ciepła jawnego dla obszaru o założonej strukturze zabudowy

$$Q_H = 1210,5 \cdot 0,13 \cdot 0,059 = 9,4\text{W/m}^2$$

Uwzględniając przyjęte w badaniach modelowych skale podobieństwa strumień ciepła w warunkach rzeczywistych kształtuje się na poziomie $Q_H = 150\text{W/m}^2$

7. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy metoda może być przydatna przy analizach obszarowych charakterystyk turbulencyjnego strumienia ciepła jawnego dla wybranych obszarów miejskich. Uzyskane w ten sposób dane mogą być wykorzystane do bezpośredniej oceny bilansu cieplnego, weryfikacji modeli numerycznych jak również mogą stanowić informację wyjściową przy tworzeniu map topoklimatycznych miasta. Mapy tego typu stają się w ostatnich latach przydatnym narzędziem w pracach planistycznych. Dzięki szczegółowym informacjom na temat warunków mikroklimatu możliwa jest między innymi ochrona terenów szczególnie podatnych na zmiany klimatyczne.

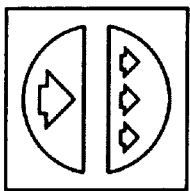
W przyszłości istotnym krokiem byłoby porównanie uzyskanych wyników z badaniami w skali naturalnej przeprowadzonymi w oparciu o podobną metodę pomiarową.

APPLICATION OF MODEL TESTS IN THE ASSESSMENT OF SURFACE SENSIBLE HEAT FLUXES

Summary: The paper presents an assessment method of surface sensible heat fluxes. The study was conducted in wind tunnel with assumed similarity scales: $K_L = 100$, $K_U = 2$, $K_{Tx} = 8$ and $K_t = 50$. Laser beam was used to record turbulent air flow over modeled built area. Refractive index structure parameter allows determination of the temperature structure parameter. Friction velocity and Monin – Obuchow function were determined assuming logarithmic velocity profile. Obtained data allowed estimation of temperature scale and magnitude of sensible heat fluxes.

Literatura

- [1] Bottema M., Mestayer P.G. *Urban roughness mapping – validation techniques and some first results*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76 (1998) 233-243
- [2] Businger J.A. et al. *Flux profile relationships in the atmospheric surface layer*. Journal of Atmospheric Science 28 (1971) 788 - 794
- [3] Consortini A., Sun Y.Y., Li Z.P., Conforti G. *A mixed method for measuring the inner scale of atmospheric turbulence*. Journal of Modern Optics, vol.37, No. 10, (1990) 1555-1560
- [4] Fortuniak K. *Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź (2010) 232s.
- [5] Klemm K. *O możliwości wykorzystania wiązki światła laserowego do oceny podstawowych parametrów turbulencji optycznej za pomocą dwóch różnych podejść*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Tom III (2008) 35-42
- [6] Klemm K., Pieszyński K., Rożniakowski K. *Badanie przepływu powietrza o nieustalonym polu gęstości z wykorzystaniem wiązki laserowej*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce Tom III (2008) 43-48
- [7] Klemm K. *Kompleksowa ocena warunków mikroklimatu w luźnych i zwartych strukturach urbanistycznych*. Polska Akademia Nauk Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, studia z zakresu inżynierii, Nr 75 (2011) 172 s.
- [8] Panofsky H.A. Tower micrometeorology. Workshop on Micrometeorology D.A. Haugen (ed) American Meteorology Society, Boston, (1972) 151 – 176
- [9] Petersen E.L., Troen I., Wieringa J. *Development of a method for wind climate analysis for non – mountainous terrain in Europe*. Proc. of European Wind Energy Conference, Hamburg, (1984) 6 – 12
- [10] Schotz S., Panofsky H.A. *Wind characteristics at the boulder atmospheric observatory*. Boundary Layer Meteorology 19 (1980) 155 – 164
- [11] Simiu E. *Equivalent static wind load for tall buildings design*. Proc. of the 4-th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow (1977) 721 – 735
- [12] Simiu E., Scanlan R.H. *Wind effects on structures*, Third ed., Wiley, New York (1996)
- [13] Wyngaard J.C., Izumi Y., Collins S.A. *Behavior of refractive – index- structure parameter near the ground*. L. Opt. Soc. Amer., 61(1971) 1646-1650



EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA EKSPERYMENTALNYCH FASAD PV BUDYNKU BIUROWO-PRZEMYSŁOWEGO W WARSZAWIE

Dominika KNERA*, Dariusz HEIM*

** Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Środowiska
ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, e-mail: dominika.knera@p.lodz.pl, dariusz.heim@p.lodz.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono całoroczną analizę numeryczną efektywności energetycznej dwóch eksperymentalnych fasad fotowoltaicznych, południowej i północnej, budynku biurowo-przemysłowego w Warszawie. Do obliczeń wykorzystano program symulacyjny ESP-r. Zastosowano dwa różne rozwiązania konstrukcyjne fasad eksperymentalnych. Energia wyprodukowana przez panele fotowoltaiczne została przeznaczona na zapewnienie zapotrzebowania energetycznego na potrzeby oświetlenia i wentylacji pomieszczeń biurowych. Analiza wykazała, że latem zastosowane systemy fotowoltaiczne generują nadwyżkę energii elektrycznej, natomiast zimą, zwłaszcza w listopadzie i grudniu, zapotrzebowanie energetyczne na wentylację i oświetlenie przewyższa wydajność eksperymentalnych fasad fotowoltaicznych.

Słowa kluczowe: fasada PV, symulacja, energia elektryczna, konwersja fotowoltaiczna,

1. WPROWADZENIE

Poprawa efektywności energetycznej budynków wiąże się nie tylko z poprawą izolacyjności termicznej przegród, ale również z zastosowaniem innowacyjnych rozwiązań i integracją odnawialnych źródeł energii z obudową budynku. Największy potencjał posiada energia promieniowania słonecznego, która może być wykorzystana zarówno w pasywnych, jak i aktywnych systemach fasadowych [1,2]. W ostatnich czasach najszybciej rozwijającą się technologią wykorzystującą energię promieniowania słonecznego jest fotowoltaika. Panele fotowoltaiczne, na skutek procesu konwersji fotoelektrycznej, generują energię elektryczną, która może być wykorzystywana do zasilania różnych systemów zapewniających w budynku odpowiednie warunki środowiska wewnętrznego.

Panele fotowoltaiczne mogą być mocowane zarówno na dachach budynków, jak również na elewacjach czy elementach zacieniających. Ponadto, systemy fotowoltaiczne mogą być instalowane w postaci dodatkowej konstrukcji nakładanej na istniejącą obudowę budynku (BAPV – ang. *Building Applied Photovoltaic*) lub zastępować ją aktywnymi elementami obudowy budynku zawierającymi ogniwa fotowoltaiczne (BIPV – ang. *Building Integrated Photovoltaic*) [3]. Efektywność systemu fotowoltaicznego jest bardzo wrażliwa na temperaturę ogniw, dla których decydująca jest temperatura otoczenia i natężenie promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię paneli [4,5]. Wraz ze wzrostem temperatury ogniw, zmienia się ich charakterystyka elektryczna i w rezultacie zmniejsza się moc panelu. Dlatego też niezwykle istotne jest utrzymywanie temperatury paneli PV na poziomie zbliżonym do temperatury Standardowych Warunków Testowych (STC – Standard Test Conditions), dla których wyznacza się efektywność paneli, czyli około 25°C. Prawidłowe zaprojektowanie instalacji fotowoltaicznej powinno, zatem uwzględniać możliwość chłodzenia paneli poprzez wentylację naturalną, mechaniczną bądź inny sposób odprowadzania ciepła.

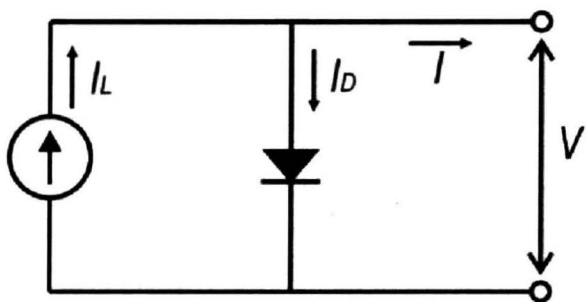
W pracy przedstawiono szczegółową analizę efektywności energetycznej fasad fotowoltaicznych istniejącego budynku. Przeanalizowano możliwość wykorzystania energii elektrycznej wygenerowanej przez panele fotowoltaiczne na potrzeby oświetlenia sztucznego i wentylacji pomieszczeń biurowych. Analizy zostały przeprowadzone za pomocą programu symulacyjnego ESP-r. Celem pracy było określenie możliwości poprawy bilansu energetycznego budynku na przestrzeni całego roku. W pracy przeanalizowano jedynie wydajność samych paneli bez uwzględnienia wpływu elementów instalacji tj.

regulatory ładowania, akumulatory, falowniki. Rzeczywista ilość uzyskanej energii może być mniejsza niż wyznaczona z obliczeń również ze względu na wartość wymaganej szczytowej mocy elektrycznej.

2. MODEL FASADY PV W PROGRAMIE ESP-R

ESP-r jest złożonym programem komputerowym, do modelowania procesów przepływu energii i masy w budynku z uwzględnieniem profili użytkowania oraz oddziaływania wybranych instalacji i systemów. Do obliczeń wykorzystywana jest metoda objętości skończonych i metoda węzłowa [6].

Materiał fotowoltaiczny modelowany jest, jako zbiór połączonych szeregowo i równolegle ogniw fotowoltaicznych o określonych, zadanych parametrach. Charakterystyka prądowo-napięciowa opisująca podstawowe parametry elektryczne ogniwa jest wyznaczana na podstawie prostego schematu zastępczego ogniwa fotowoltaicznego [7].



Rys. 1. Schemat obwodu typu „one-diode” [7].
Fig. 1. Simple equivalent one-diode model [7].

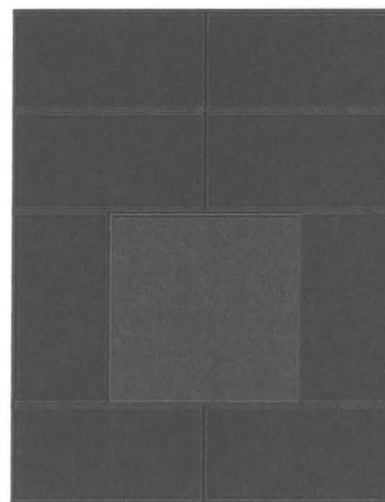
Panel fotowoltaiczny jest definiowany, jako przegroda warstwowa zbudowana z zewnętrznego przeszklenia, aktywnego materiału reprezentującego zestaw ogniw fotowoltaicznych, warstwy łączącej i tylnej warstwy przeszklenia. Poszczególne warstwy opisane są za pomocą trzech węzłów: wewnętrznego – definiującego właściwości danego materiału, i dwóch granicznych węzłów łączących kolejne warstwy. Warstwa zawierająca ogniwa fotowoltaiczne jest definiowana w postaci hybrydowego materiału o nietypowych właściwościach. Energia promieniowania docierającego do węzła wewnętrznego warstwy fotowoltaicznej ulega równocześnie konwersji na energię cieplną i elektryczną z uwzględnieniem zjawisk optycznych na granicy ośrodków, w szczególności odbicia promieniowania słonecznego. Ilość energii elektrycznej uzyskanej w takim materiale jest wyznaczana za pomocą modeli elektrycznych wprowadzonych do programu ESP-r. W pracy wykorzystano WATSUN PV model, który uwzględnia zależność napięcia rozwarcia (V_{oc}) i prądu zwarcia (I_{sc}) zarówno od natężenia promieniowania i temperatury ogniwa [8,9].

3. OPIS ANALIZOWANYCH PRZYPADKÓW

3.1. Budowa fasad PV

Obie fasady fotowoltaiczne analizowane w pracy są zbudowane z paneli cienkowarstwowych CIS (ang. *Copper Indium Diselenide* – selenek indowo-miedziowy) o sprawności podanej przez producenta na poziomie 12%. Przy maksymalnej wydajności moc pojedynczego panelu wynosi 80 Wp, napięcie 35 V, a natężenie prądu 2,3 A.

Analizowane modele fasad odwzorowują fasady rzeczywiste budynku biurowo-przemysłowego w Warszawie. Ze względu na istniejący kształt i profil użytkowania budynku projekt fasad eksperymentalnych musiał być dostosowany do istniejącej konstrukcji i architektury obiektu. Obie fasady PV zostały zbudowane, jako fasady wentylowane. Panele PV umieszczono na podkonstrukcji aluminiowej zakotwiczonej do istniejącej ściany dwuwarstwowej.

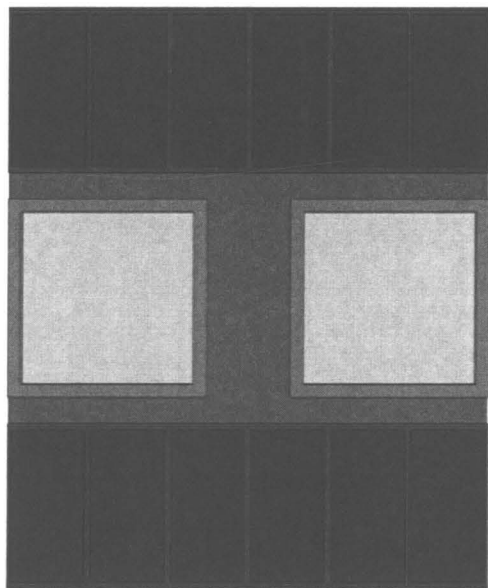


Rys. 2. Schemat południowej fasady PV.
Fig. 2. View of the south oriented PV façade.

Eksperymentalna fasada południowa stanowi fragment ściany hali produkcyjno-magazynowej. Instalacja fotowoltaiczna składa się z 8 paneli, a centralnie położona powierzchnia jest imitacją otworu okiennego (rys. 2). Projekt fasady południowej jest propozycją modułowego rozwiązania fasady budynku biurowego, gdzie każda taka powierzchnia przykrywa pole o wymiarach 2,4×3,0 m. Łączna powierzchnia paneli wynosi 5,76 m², zaś okna 1,44 m².

Eksperymentalna fasada północna została wmontowana w ścianę części biurowej budynku. Fasada północna jest najsłabiej nasłonecznioną elewacją budynku. Dlatego też liczbę paneli fotowoltaicznych dla fasady północnej zwiększono, aby efektywność obu analizowanych fasad była porównywalna. Ze względu na układ i wielkość istniejących okien na ścianie północnej zaproponowano rozwiązanie w postaci dwóch poziomych pasów składających się z 6 paneli umieszczonych nad i pod

oknami (rys. 3). Łączna powierzchnia paneli wynosi $8,64 \text{ m}^2$, okien $2,54 \text{ m}^2$ zaś muru $3,92 \text{ m}^2$. W rezultacie liczbę paneli fotowoltaicznych na fasadzie północnej zwiększono o 50% w stosunku do fasady południowej.

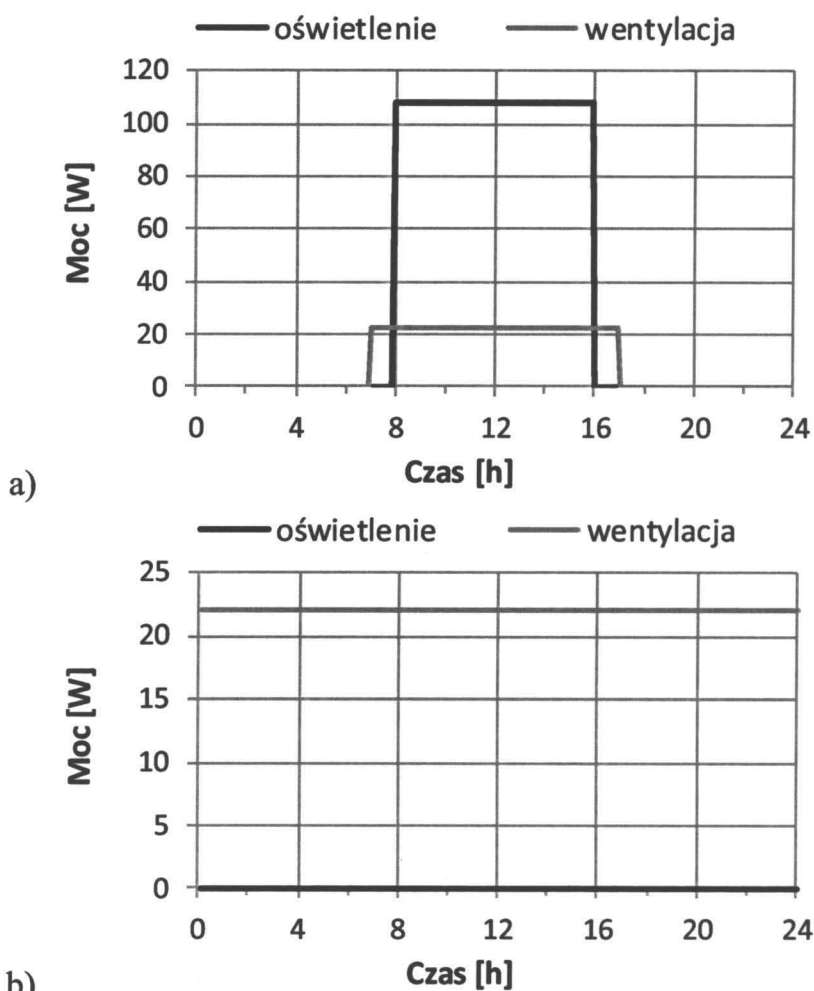


Rys. 3. Schemat północnej fasady PV.
Fig. 3. View of the north oriented PV façade.

3.2. Opis założeń

Dane klimatyczne wykorzystane w obliczeniach przyjęto zgodnie z Typowym Rokiem Meteorologicznym wyznaczonym dla miasta Warszawy. Analiza efektywności energetycznej fasad została przeprowadzona dla całego roku. Ze względu na różne profile wykorzystania energii elektrycznej z fasad eksperymentalnych rok kalendarzowy podzielono na okres zimowy, trwający od października do marca, i letni – od kwietnia do września. Podział ten uwarunkowany był nie tylko względami ogrzewczymi, ale również dostępnością światła dziennego, długością dnia itp. Zaproponowano, że energia elektryczna wygenerowana przez panele PV będzie przeznaczona na potrzeby oświetlenia sztucznego i wentylacji dwóch pomieszczeń biurowych. Przyjęto, że w każdym pomieszczeniu będą znajdować się trzy oprawy typu LED o łącznej mocy 108 W i indywidualna centrala wentylacyjna z rekuperacją o mocy na poziomie 22 W . W okresie zimowym oświetlenie sztuczne będzie włączone przez cały czas przebywania pracowników w biurze, czyli w godzinach 8-16. Natomiast w okresie letnim, założono, że oświetlenie sztuczne nie będzie włączane. Wentylacja, zgodnie z założeniami będzie działała od 7 do 17 w okresie zimowym, czyli w czasie pracy i dodatkowo godzinę przed i po obecności pracowników, w celu przewietrzenia pomieszczenia. W okresie letnim dodatkowo zastosowano nocne przewietrzanie i przyjęto, że centrala wentylacyjna będzie działała całą dobę. Na rys. 4 pokazano profile

działania oświetlenia i wentylacji w okresie zimowym i letnim.



Rys. 4. Dzienny profil działania oświetlenia sztucznego i wentylacji w okresie a) zimowym, b) letnim.
Fig. 4. Daily operation profile of artificial lighting and ventilation during a) winter, b) summer season.

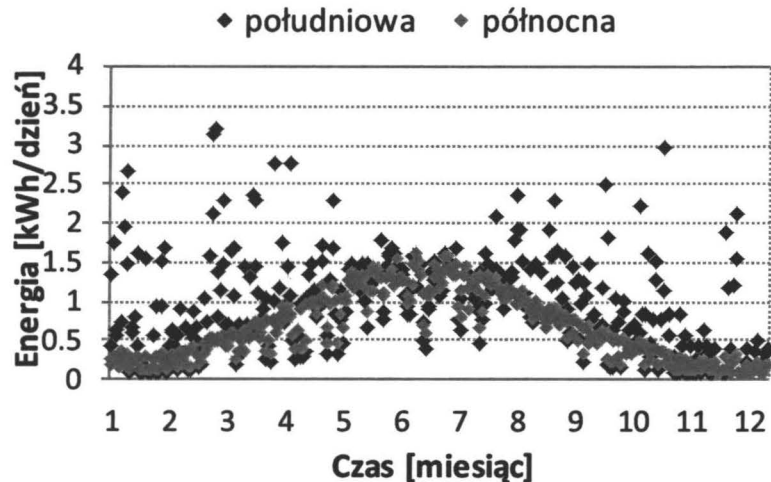
Energia wygenerowana przez panele fotowoltaiczne musi zostać odpowiednio przetworzona, aby mogła być wykorzystana do zasilania przyjętych odbiorników. Zaproponowano system sieciowy składający się z regulatora ładowania, akumulatorów i falownika do odbioru i przetworzenia prądu stałego otrzymywanego z paneli PV na prąd zmienny wykorzystywany przez oświetlenie i wentylację. Uwzględniono łączną sprawność działania poszczególnych urządzeń na poziomie 86%.

4. WYNIKI I ICH ANALIZA

Analizy efektywności energetycznej eksperymentalnych fasad fotowoltaicznych przeprowadzono w dwóch etapach. Najpierw przeanalizowano wydajność energetyczną na potrzeby zasilania odbiorników w pomieszczeniu biurowym dla każdej fasady indywidualnie. Następnie połączono odbiór energii z obu fasad PV i zaproponowano wspólne zasilanie dwóch pomieszczeń biurowych jednocześnie.

Symulacje zostały wykonane z 15 minutowym krokiem czasowym, aby uzyskać szczegółowe wyniki. Wartości danych klimatycznych dla poszczególnych godzin zostały interpolowane liniowo pomiędzy początkową i końcową wartością danej zmiennej, np. promieniowania słonecznego, temperatury powietrza zewnętrznego. Następnie, otrzymane rezultaty i planowane zapotrzebowanie energetyczne odbiorników zbilansowano w okresie dziennym i miesięcznym.

Poniższy rysunek (rys. 5), przedstawia dzienną ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez panele PV poszczególnych fasad. Można zaobserwować, że w okresie letnim, wydajność fasady południowej i północnej jest podobna. Jest to spowodowane przede wszystkim większą liczbą paneli PV w fasadzie północnej oraz kątem padania promieniowania na pionowe płaszczyzny fasady. W miesiącach letnich, kiedy słońce jest wysoko, a kąt padania na powierzchnię zorientowaną na południe duży, większość promieniowania jest odbijana i tylko część absorbowana i zamieniana na energię elektryczną. Natomiast w okresie zimowym, fasada południowa produkuje znacznie więcej energii elektrycznej w porównaniu do fasady północnej, do której dociera tylko promieniowanie rozproszone. Ponadto w powyższym okresie dla fasady zorientowanej na południe maleje wpływ współczynnika odbicia i większa część promieniowania dociera bezpośrednio do fotoogniwa.

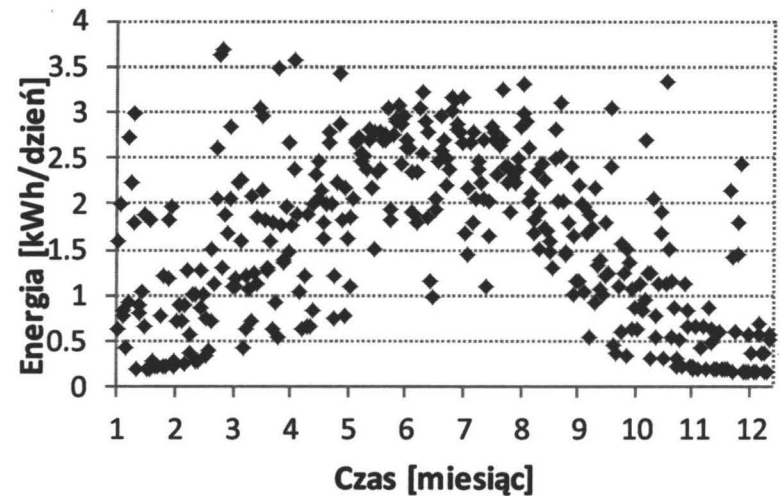


Rys. 5. Energia elektryczna wygenerowana przez panele poszczególnych fasad PV w ciągu dnia.

Fig. 5. Daily electrical energy generated by the panels of individual PV façades.

Na rys. 6 pokazano dzienną wartość energii elektrycznej wyprodukowanej przez panele fotowoltaiczne obu fasad w ciągu roku. Maksymalne wartości dziennej produkcji energii przez wszystkie panele (ponad 3,5 kWh/dzień) można zaobserwować w miesiącach przejściowych, marcu, kwietniu i maju, jest to spowodowane wysoką wydajnością fasady południowej w słoneczne dni. Wysoka efektywność paneli wynika z korzystnego położenia słońca w trakcie oświetlania elewacji południowej w okresie przejściowym. Kąt padania promieniowania słonecznego na powierzchnię

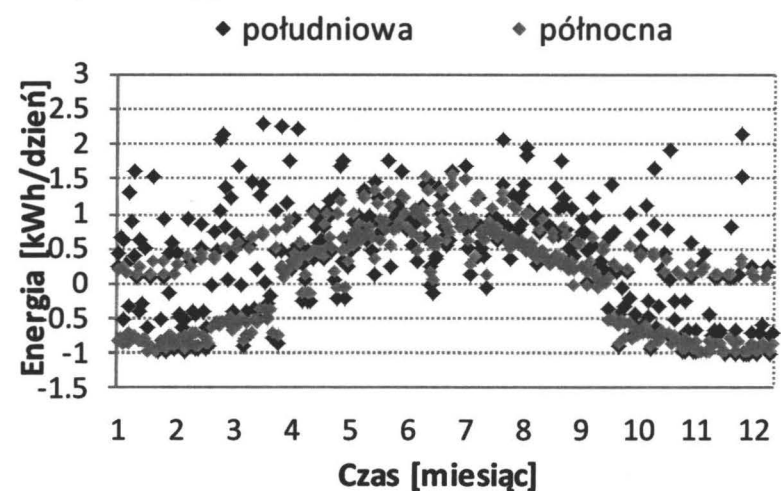
fasady jest na tyle niski, że większość promieniowania jest absorbowana przez panele i tylko niewielka ich część ulega odbiciu. Jednakże są to jedynie pojedyncze dni, zaś ogólnie najwięcej energii wygenerowanej przez panele PV przypada na okres letni.



Rys. 6. Łączna energia elektryczna wygenerowana przez panele obu fasady PV w ciągu dnia.

Fig. 6. Total daily electrical energy generated by panels of both PV façades.

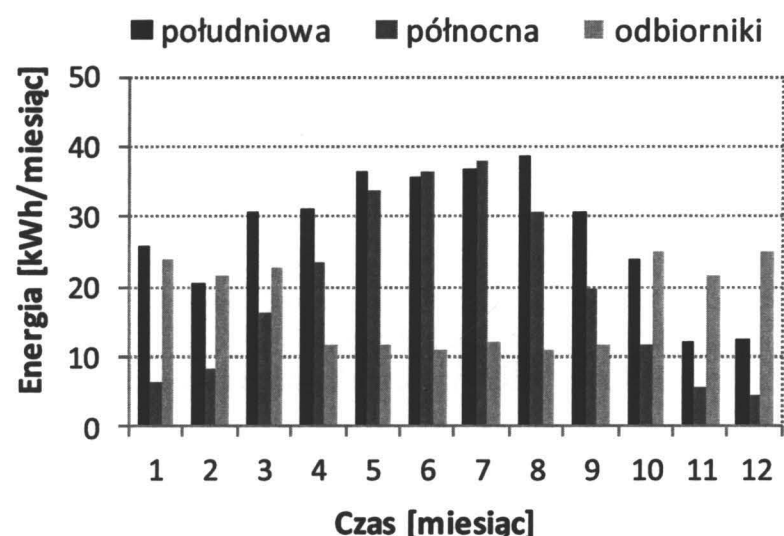
Następnym etapem przedstawionej analizy było uwzględnienie odbiorników, czyli strumienia energii potrzebnej do zasilenia oświetlenia sztucznego i wentylacji. Po dobowym zbilansowaniu energii wyprodukowanej przez panele poszczególnych fasady oraz niezbędnej do zasilenia odbiorników otrzymano wykres przedstawiony na rys. 7. Można zauważyć, że w okresie letnim, czyli od kwietnia do września, kiedy energia generowana przez panele jest zużywana tylko na potrzeby wentylacji, występuje jej znaczna nadprodukcja. Natomiast w okresie zimowym nie ma jednoznaczności w wynikach zarówno dla fasady południowej jak i północnej. Dla części dni energia wyprodukowana przez panele fotowoltaiczne jest wyższa niż zapotrzebowanie odbiorników, ale w większości jest niewystarczająca.



Rys. 7. Różnica między energią wygenerowaną przez panele PV a zapotrzebowaniem energetycznym odbiorników w ciągu dnia.

Fig. 7. The difference between the energy generated by the PV panels and energy demand of receivers during the day.

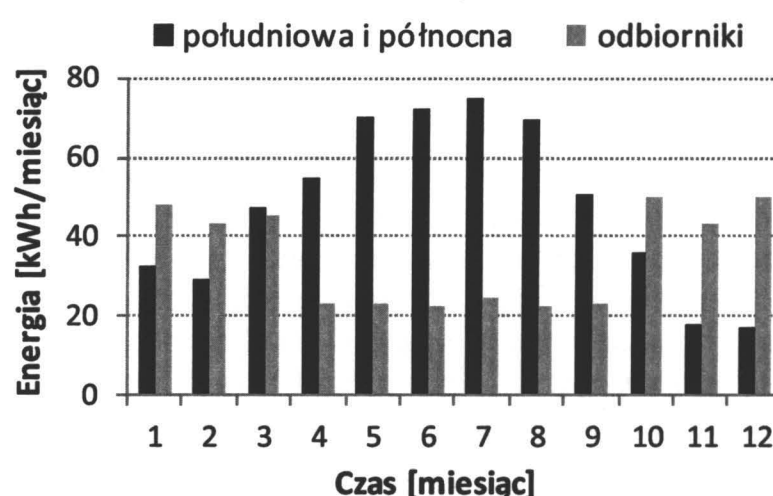
Kolejne wykresy przedstawiają łączne, miesięczne zestawienia energii wyprodukowanej przez wszystkie panele fotowoltaiczne i wymaganej przez zaproponowane odbiorniki.



Rys. 8. Miesięczna suma energii wygenerowanej przez panele poszczególnych fasad PV i zapotrzebowanie energetyczne odbiorników w pomieszczeniu biurowym.
Fig. 8. Monthly energy generated by panels of each PV façade and energy demand of receivers in the office room.

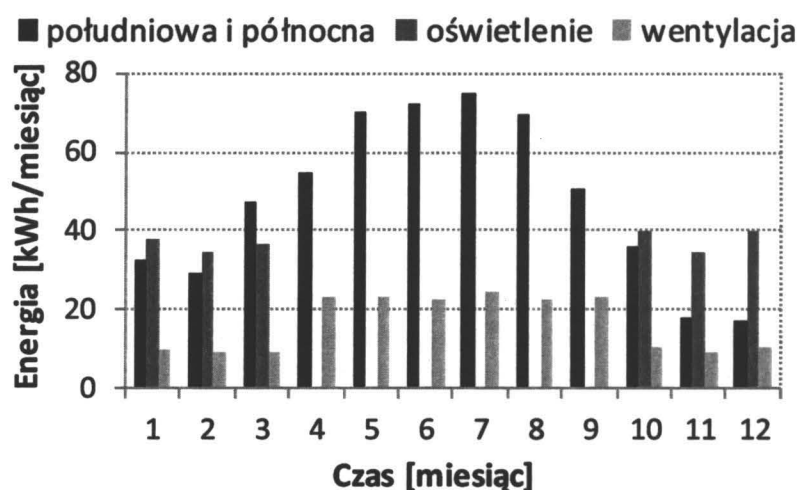
Na rys. 8 pokazano porównanie energii wygenerowanej przez panele poszczególnej fasady oraz zapotrzebowanie energetyczne na oświetlenie i wentylację, z uwzględnieniem weekendów, w jednym pomieszczeniu biurowym. Można zaobserwować, że w miesiącach letnich produkcja energii przez panele fasady północnej jest zbliżona, a w czerwcu i lipcu nawet większa, w porównaniu do paneli fasady południowej. Jednakże zimą fasada północna jest znacznie mniej efektywna. Natomiast wydajność fasady południowej jest bardziej równomierna i jedynie w listopadzie oraz grudniu następuje istotny spadek produkcji energii. Ponadto tylko w tych miesiącach fasada południowa nie jest w stanie pokryć całego zapotrzebowania energetycznego na oświetlenie i wentylację. Energia wyprodukowana przez panele fasady północnej jest wystarczająca tylko w okresie letnim.

Następny wykres, rys. 9, przedstawia zestawienie energii wyprodukowanej łącznie przez panele fasady północnej i południowej z zapotrzebowaniem energetycznym na oświetlenie i wentylację w dwóch pomieszczeniach biurowych. Przy połączeniu zasilania z paneli dwóch analizowanych fasad możemy zapewnić energię na oświetlenie i wentylację w obu pomieszczeniach tylko w okresie letnim i dodatkowo w marcu. Natomiast w pozostałych miesiącach ilość produkowanej energii elektrycznej jest niewystarczająca.



Rys. 9. Miesięczna energia wygenerowaną przez panele obu fasad PV i zapotrzebowanie energetyczne odbiorników w dwóch pomieszczeniach biurowych.
Fig. 9. Monthly energy generated by the panels of both PV façades and energy demand of receivers from the two offices.

Na ostatnim wykresie, rys. 10, rozdzielono energię potrzebną na zasilanie oświetlenia sztucznego i wentylacji. Można zaobserwować, że w okresie zimowym energia wyprodukowana przez panele PV może jedynie pokryć zapotrzebowanie na wentylację i jest niewystarczająca dla oświetlenia sztucznego. Natomiast latem można odnotować znaczny nadmiar energii elektrycznej, która przy założeniu układu autonomicznego jest trudna do zakumulowania. Natomiast cały system charakteryzowałby się dużą efektywnością, przy założeniu pełnej integracji z siecią elektroenergetyczną. W tym przypadku łączny, roczny bilans energii elektrycznej jest dodatni i wynosi 152,37 kWh/rok.



Rys. 10. Miesięczna energia wygenerowaną przez panele obu fasad PV i zapotrzebowanie energetyczne na potrzeby oświetlenia i wentylacji w dwóch pomieszczeniach biurowych.
Fig. 10. Monthly energy generated by the panels of both PV façades and energy demand for lighting and ventilation in two offices rooms.

5. WNIOSKI

W pracy przedstawiono obliczenia wydajności energetycznej dwóch eksperymentalnych fasad fotowoltaicznych oraz analizę możliwości ich zastosowania, jako źródła zasilania na potrzeby oświetlenia sztucznego i wentylacji dwóch pomieszczeń biurowych.

Zaobserwowano, że w miesiącach letnich energia wygenerowana przez panele PV fasad eksperymentalnych jest wystarczająca, aby pokryć zapotrzebowanie na potrzeby indywidualnej wentylacji z odzyskiem ciepła. Dodatkowo w okresie od kwietnia do września występuje znaczna nadprodukcja energii elektrycznej, która może zostać efektywnie wykorzystana jedynie poza tym okresem. Natomiast w okresie zimowym wydajność fasad eksperymentalnych jest za niska, aby równocześnie zapewnić wymagania energetyczne na potrzeby oświetlenia i wentylacji. Tym samym, w analizowanym systemie nie jest możliwe efektywne wykorzystanie energii odnawialnej na przestrzeni całego roku bez konieczności podłączenia systemu do zewnętrznej sieci elektroenergetycznej.

Jak należało się spodziewać istotne zwiększenie powierzchni pokrytej panelami PV na elewacji północnej zwiększyło roczny uzysk energii elektrycznej. Przy zastosowaniu o 50% większej liczby paneli, fasada północna może być porównywalna z fasadą południową pod względem efektywności energetycznej w okresie letnim. Jednak w okresie zimowym, w którym do elewacji północnej dociera jedynie promieniowanie rozproszone uzyskany efekt energetyczny jest nadal nieznaczący.

ENERGY EFFICIENCY OF EXPERIMENTAL PV FACADES INSTALLED AT OFFICE-INDUSTRIAL BUILDING IN WARSAW

Summary: The paper presents the whole year numerical analysis of the energy efficiency of the two experimental south and north oriented photovoltaic facades of the office and industrial building in Warsaw. Calculations were done using simulation program ESP-r. Two different constructions of the experimental facades were applied. The energy produced by the photovoltaic panels was intended to provide the energy demand for artificial lighting and ventilation in office rooms. The analysis showed that in the summer the photovoltaic systems generate surplus of electricity, while in winter, especially in November and December, the energy demand for ventilation and lighting exceeds the production capacity of photovoltaic facades.

Literatura

[1] Quesada G., Rouse D., Dutil Y., Badache M., Hallé S., *A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 2820-2832

[2] Quesada G., Rouse D., Dutil Y., Badache M., Hallé S., *A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 2643-2651

[3] Ceron I., Caamano-Martin E., Neila F. J. *'State-of-the-art' of building integrated photovoltaic products*. Renewable Energy 58 (2013) 127-133

[4] Heim D., *The simultaneous effect of the operating temperature and solar radiation of the efficiency of photovoltaic panels* Archives of civil engineering LVII 3 (2011) 261-274

[5] Knera D., Heim D. *Heat transfer model of PV panel integrated with "Rainscreen Cladding System"* proceedings of Heat Transfer XIII Conference (2014)

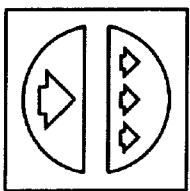
[6] Clarke J.A., *Energy Simulation in building design*, 2001.

[7] Kelly N., *Towards a design environment for building-integrated energy systems: the intergration of electrical power flow modelling with building simulation*, PhD thesis, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 1998.

[8] Thevenard D., *Review and recommendations for improving the modelling of building integrated photovoltaic systems*. Proc. of the 9th International IBPSA Conference, Montreal, Canada, August 15-18, 2005.

[9] Mottillo M., Beausoleil-Morrison I., Couture L., Poissant Y., *A comparison and validation of two photovoltaic models*. Canadian Solar Buildings Conference. Montreal, 2006.

Niniejsza praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu pt.: „Promowanie zrównoważonego podejścia do efektywności energetycznej w budownictwie, jako narzędzia ochrony klimatu w miastach Niemiec i Polski: opracowanie technologii fasady dla potrzeb budynków o zerowej emisji” (GPPE).



MODELE TEORETYCZNE CZASU POGŁOSU W ANALIZIE POMIESZCZEŃ AUDYTORYJNYCH

Marcelina OLECHOWSKA, Artur NOWOŚWIAT*

** Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: marcelina.olechowska@polsl.pl, artur.nowoswiat@polsl.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analiz teoretycznych czasu pogłosu w wybranych trzech aulach. Na podstawie tych analiz wyznaczono różnice pomiędzy stosowanymi modelami a pomiarem w warunkach rzeczywistych. Wyznaczone różnice posłużą do opracowania nowej metody szacowania czasu pogłosu.

Słowa kluczowe: Czas pogłosu, model Sabine'a, analiza reszt.

1. WPROWADZENIE

W ogólnie dostępnych materiałach dotyczących akustyki pomieszczeń sprawdzano przydatność modeli teoretycznych czasu pogłosu oraz porównywano nowe metody z wartościami otrzymanymi według najczęściej stosowanych formuł: Sabine'a, Eyringa, czy Fitzroya. Publikacje światowe można podzielić na następujące grupy: grupa I – artykuły wprowadzające nowe formuły do predykcji czasu pogłosu [10], [15], [16], [20]; grupa II – przedstawiająca podejście do wyznaczania czasu pogłosu za pomocą perturbacji, sieci neuronowych, MES oraz ogólnie różnych metod numerycznych: [1], [3], [12], [14], [17], [18]; grupa III analizująca zastosowanie formuł klasycznych do wnętrz o skomplikowanym kształcie [8], [9], [11], [19]; grupa IV przedstawia wyniki swoich badań przy zastosowaniu współczynników pochłaniania wyznaczonych ze wzoru Sabine'a [4], [7], [13]; w grupie V analizowano wpływ wypełnienia wnętrza publicznością a także badano wpływ nierównomiernego rozkładu absorpcji [1], [2], [5], [6]. Badania tych badaczy zainspirowały autorów niniejszego artykułu do wykorzystania znanych wyników i metod w celu opracowania nowej metody na tych metodach bazującej.

2. BADANIA

Przedmiotem badań były trzy aule. Wykończenia wewnętrzne ścian i sufitów wykonane jako tynki cementowo-wapienne, są pokryte farbą. Posadzka wykonana jest z lastryka. Stropy w aulach wykonane są jako płytowo-belkowe oparte na ustroju ramowym. Ściany osłonowe murowane prawdopodobnie z pustaków. Aule posiadają amfiteatralny układ miejsc siedzących dla słuchaczy (ławki drewniane). Kubatury badanych pomieszczeń wynoszą kolejno 300 m³, 840 m³, 423 m³.

Wiadomym jest iż przebieg charakterystyki czasu pogłosu w funkcji częstotliwości zależy od geometrii układu oraz rodzaju zastosowanych materiałów i ustrojów dźwiękochłonnych.

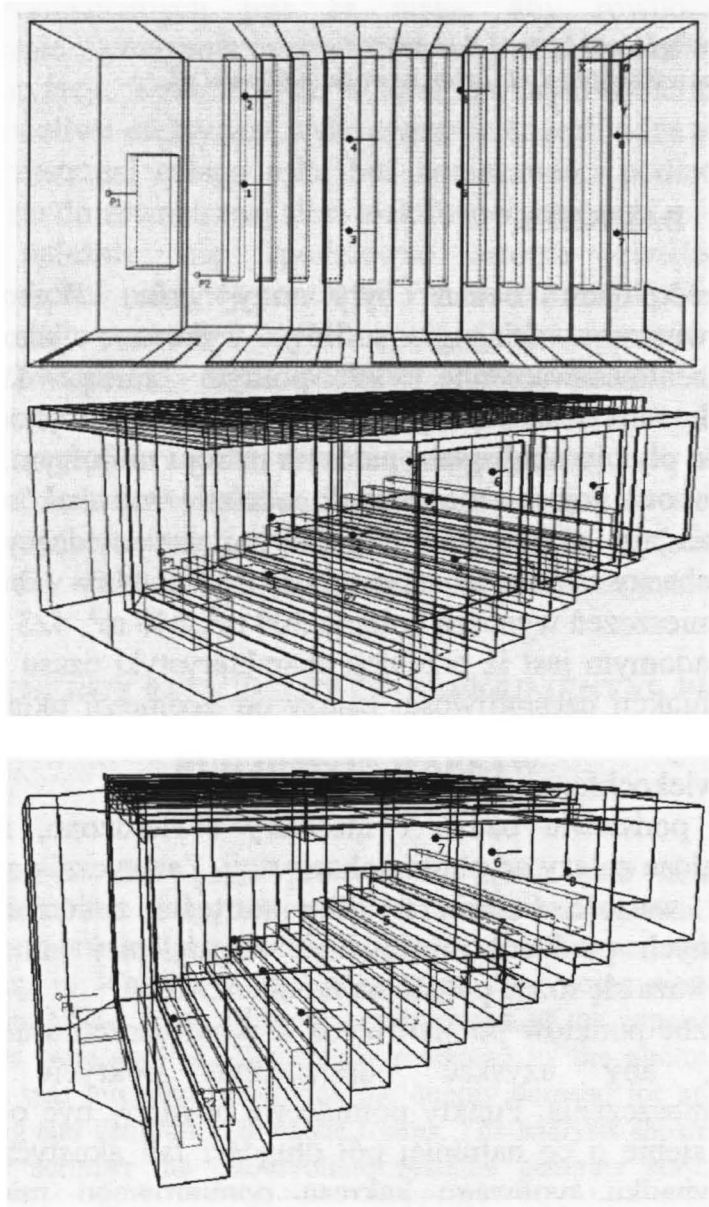
Na podstawie badań i literatury stwierdzono, że czas pogłosu zależy od punktu obserwacji. Zazwyczaj podawana jest wartość średnia z kilku wartości zmierzonych w różnych punktach obserwacji. A najlepiej jak jeszcze rozważa się różne położenia źródła dźwięku.

Liczbę punktów pomiarowych w pomieszczeniu ustala się tak, aby uzyskać odpowiednie pokrycie całego pomieszczenia. Punkty pomiarowe powinny być oddalone od siebie o co najmniej pół długości fali akustycznej. W przypadku typowego zakresu pomiarowego minimalna odległość punktów wynosi około 2 m. Odległość mikrofonu od powierzchni ograniczającej pomieszczenie powinna wynosić co najmniej ćwierć długości fali, czyli około 1 m. Minimalną odległość d_{min} między punktem pomiarowym i źródłem dźwięku oblicza się ze wzoru

$$d_{min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}}$$

przy czym przez V – rozumiemy objętość pomieszczenia, c – prędkość dźwięku, a przez T – szacunkową spodziewaną wartość czasu pogłosu.

W przypadku badań opisanych w tym artykule punkty pomiarowe umieszczono w rzędach ławek na wysokości 1,2 m od podłogi pomieszczenia, natomiast wszechkierunkowe źródło dźwięku na wysokości 1,5 m. Przyjęto dwie pozycje źródła dźwięku $P1$ i $P2$. Pozycja $P1$ odpowiada usytuowaniu źródła dźwięku przy katedrze, pozycja $P2$ w lewym narożniku auli. Badania akustyczne przeprowadzono dla wnętrza niezapełnionego słuchaczami. Pomiar przeprowadzono w 8 punktach pomiarowych zlokalizowanych w badanym wnętrzu. Rozmieszczenie punktów pomiarowych, a także pozycje źródła dźwięku i wewnątrz auli przedstawiają rysunki 1.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych i źródła dźwięku w badanych aulach.

Fig. 1. Layout scheme of measurement points and sound sources in tested auditoriums.

Badania przeprowadzono za pomocą pomiaru, symulacji ODEON, wzorów teoretycznych.

a) Pomiar – wykonano aparaturą spełniającą wszelkie wymagania metrologiczne dla przyrządów klasy dokładności 1. Układ pomiarowy składał się z toru nadawczego i odbiorczego.

Część nadawcza układu obejmowała następujące elementy:

- Kolumna głośnikowa o kulistej charakterystyce promieniowania,
- Generator szumu różowego i białego wraz ze wzmacniaczem,

Część odbiorcza układu obejmowała następujące elementy:

- Analizator akustyczny,
- Mikrofony,
- Przedwzmacniacz,
- Kalibrator akustyczny
- Komputer z oprogramowaniem pozwalającym na odczytywanie i obróbkę wyników.

Pomiary czasu pogłosu wykonano przy użyciu metody szumu przerywanego. Zastosowano pobudzenie wnętrza za pomocą szerokopasmowego szumu ukształtowanego tak, aby uzyskać w przybliżeniu różowe widmo dźwięku pogłosowego w stanie ustalonym dla zakresu obejmującego pasma 1/3-oktawowe o częstotliwościach środkowych 50 – 5000 Hz. Źródło dźwięku wytwarzało poziom ciśnienia akustycznego wystarczający do tego, aby krzywa zaniku rozpoczynała się przynajmniej 35 dB powyżej tła akustycznego w odpowiednim zakresie częstotliwości. Celem uzyskania wysokiej dokładności wyników i zminimalizowania wpływu losowości sygnału pobudzającego powtórzono czterokrotnie pomiar w każdym punkcie. Wartości uzyskanych czasów pogłosu uśredniono stosując regułę trzech sigm.

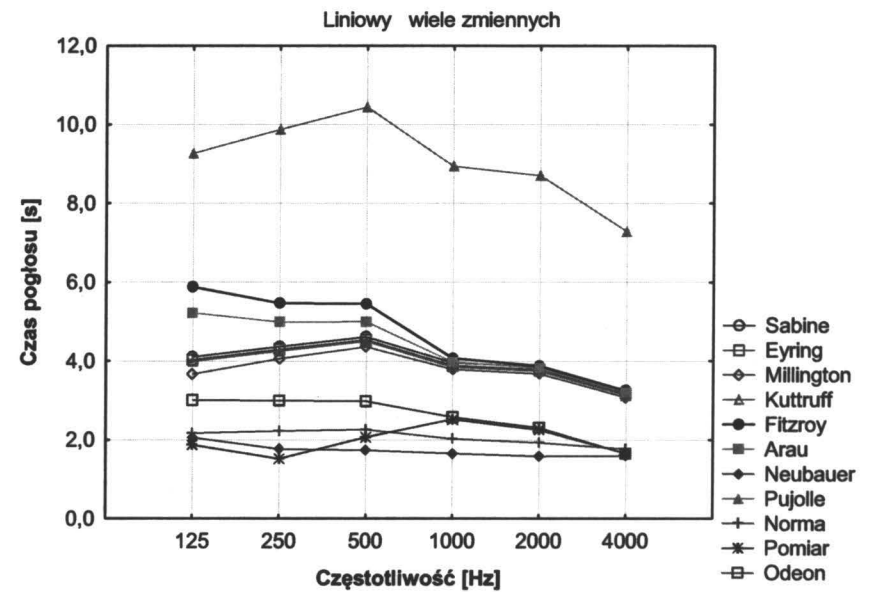
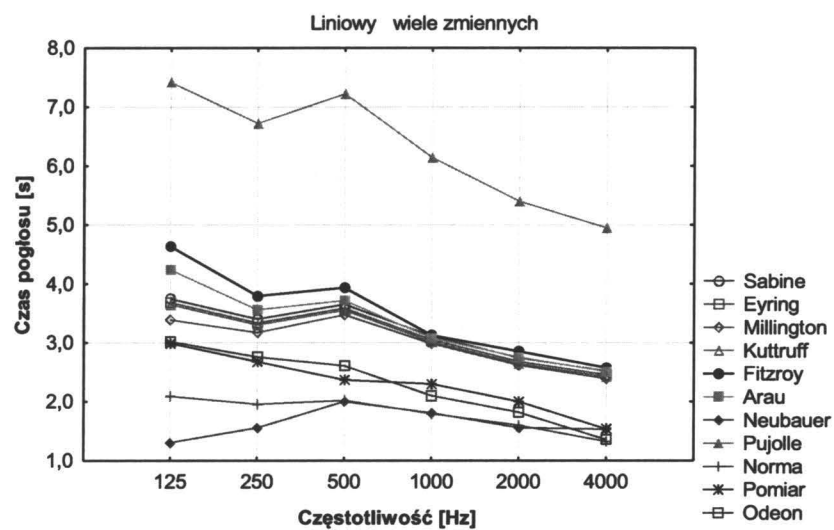
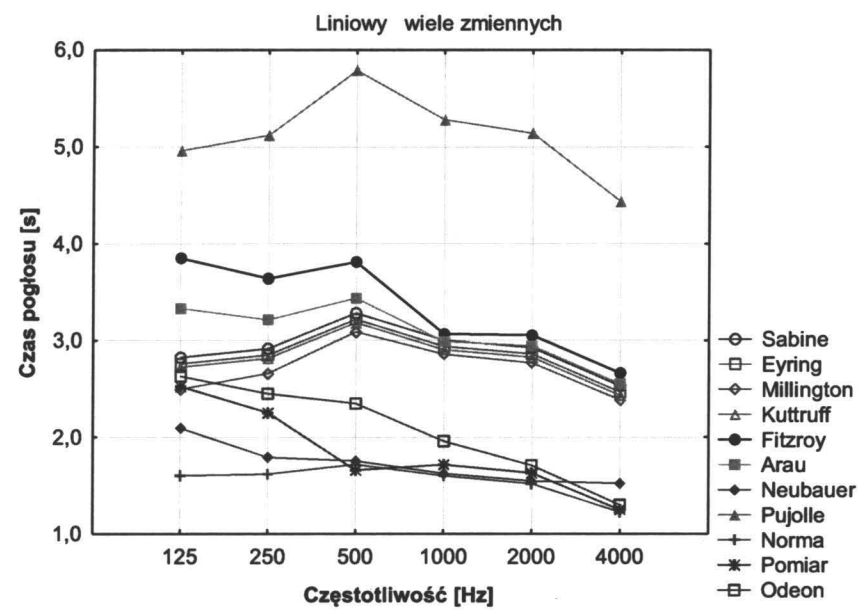
b) Symulacje ODEON – Program ODEON podobnie jak pomiar pozwala wyznaczyć czas pogłosu w każdym zadanym punkcie pomieszczenia. Jest to możliwe dzięki możliwości szacowania krzywej zaniku dźwięku. Wirtualne fale są wysyłane ze źródła w losowych kierunkach. Na skutek absorpcji dźwięku przez przegrody ograniczające pomieszczenie maleje energia tychże wysłanych fal, która jest rejestrowana przez program. Na podstawie dużej liczby fal obliczana jest globalna energetyczna krzywa zaniku dźwięku.

Pozycje wirtualnego źródła dźwięku oraz wirtualnych odbiorników przyjęto podobnie jak ich rzeczywistych odpowiedników podczas pomiarów.

c) Wzory teoretyczne – do obliczeń przyjęto znane w akustyce wnętrza modele: Sabine'a, Eyringa, Millingtona, Kuttruffa, Fitzroya, Arau, Neubaera, Pujolle, wzór normowy.

3. WYNIKI

Dla wszystkich stanowisk badawczych (I) – (III) wyznaczono czas pogłosu za pomocą wzorów, pomiarów i symulacji akustycznych. Następnie porównano uzyskane wartości czasów pogłosu różnymi metodami (Sabine'a, Eyringa, Millingtona, Kuttruffa, Arau, Neubauera, Pujolle'a i zaleceniami normy, a także symulacją akustyczną) z pomiarem. Obliczenia wykonano przy użyciu klasycznych modeli do predykcji czasu pogłosu. Wyniki czasu pogłosu w aulach przedstawiono na poniższych wykresach:



Rys. 2. Charakterystyki czasu pogłosu uzyskane różnymi metodami. Wyniki przedstawione kolejno odpowiadają aulom I, II, III.

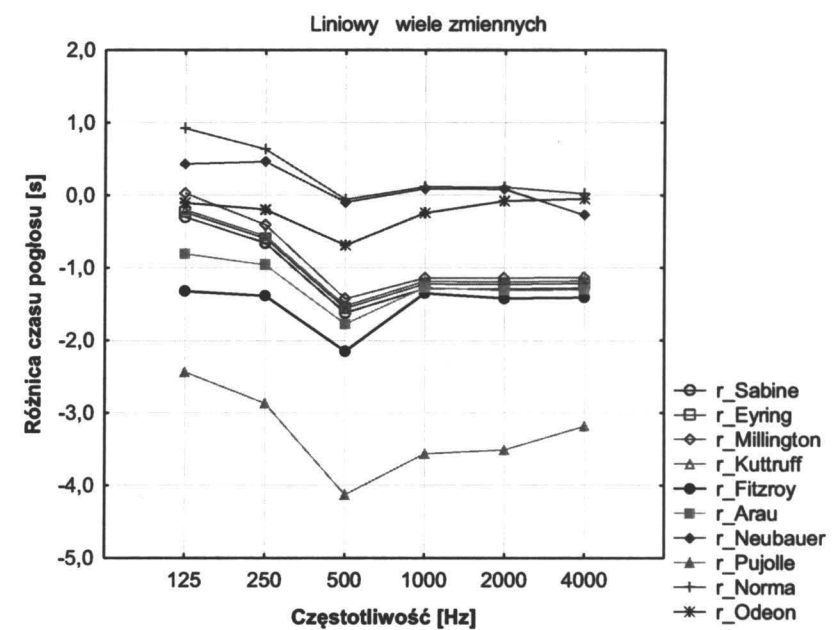
Fig. 2. Characteristics of the reverberation time obtained by different methods. The results presented consecutively correspond to auditoriums I, II, III.

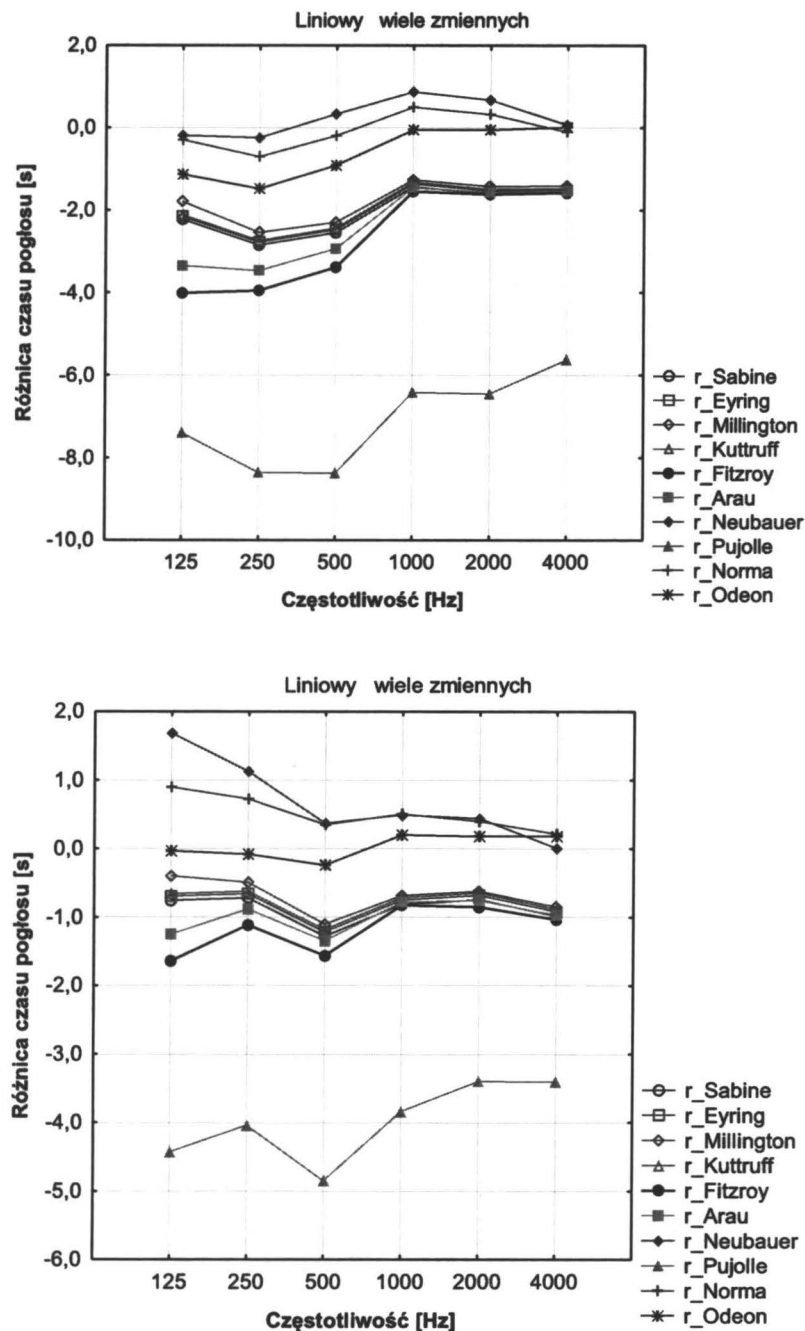
W celu dalszych analiz zdefiniowano odchylenie wyników otrzymanych za pomocą wzorów teoretycznych od wyników pomiarów i odchylenie to nazwano resztą. Reszta zdefiniowana jest jako

$$R = T_p - T_m \quad (1)$$

gdzie T_p – jest czasem pogłosu uzyskanym z pomiaru
 T_m – jest czasem pogłosu uzyskanym z metody teoretycznej.

Wyniki przebiegów reszt przedstawiono poniżej





Rys. 3. Charakterystyki reszt. Wyniki przedstawione kolejno odpowiadają aulom I, II, III.

Fig. 3. Characteristics of residues. The results presented consecutively correspond to auditoriums I, II, III.

4. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Na podstawie otrzymanych wyników (rysunek 2) można stwierdzić, że formuła Pujolle'a jest nieodpowiednia dla badanych wnętrz typu aula. Wykresy wykazują pewną tendencję w częstotliwości 500 Hz (pik w dół „wartość z pomiaru”, a w górę „wartość z metod”). Zaobserwowano, że uzyskane wartości z metod wyznaczania czasu pogłosu podzieliły się na dwie grupy: pierwszą tworzą wzór Neubauera i normowy, Odeon oraz pomiar, a drugą — pozostałe formuły.

Analiza reszt (rysunek 3) dla pierwszego pomieszczenia, otrzymana z różnicy pomiędzy pomiarem a modelem obliczeniowym dowodzi, że porównywalne wartości z pomiarem uzyskano dla częstotliwości:

- 125 Hz — z formuły Millingtona,
- 250 Hz — z symulacji komputerowej,
- 500 Hz — z wzoru normowego,
- 1 kHz — z formuły Neubauera,
- 2 kHz — z formuły Neubauera oraz symulacji komputerowej,
- 4kHz — z wzoru normowego.

Analiza reszt (rysunek 3), dla drugiego pomieszczenia wykazała, że porównywalne z pomiarem wartości uzyskano dla częstotliwości:

- 125 – 2000 Hz — z symulacji komputerowej,
- 4 kHz — z formuły Neubauera.

Analiza reszt (rysunek 3), dla trzeciego pomieszczenia, wykazała, że wartości porównywalne z pomiarem uzyskano dla częstotliwości:

- 125 – 250 Hz — z formuły Neubauera
- 500 Hz — z wzoru normowego,
- 1 – 4 kHz — z symulacji komputerowej.

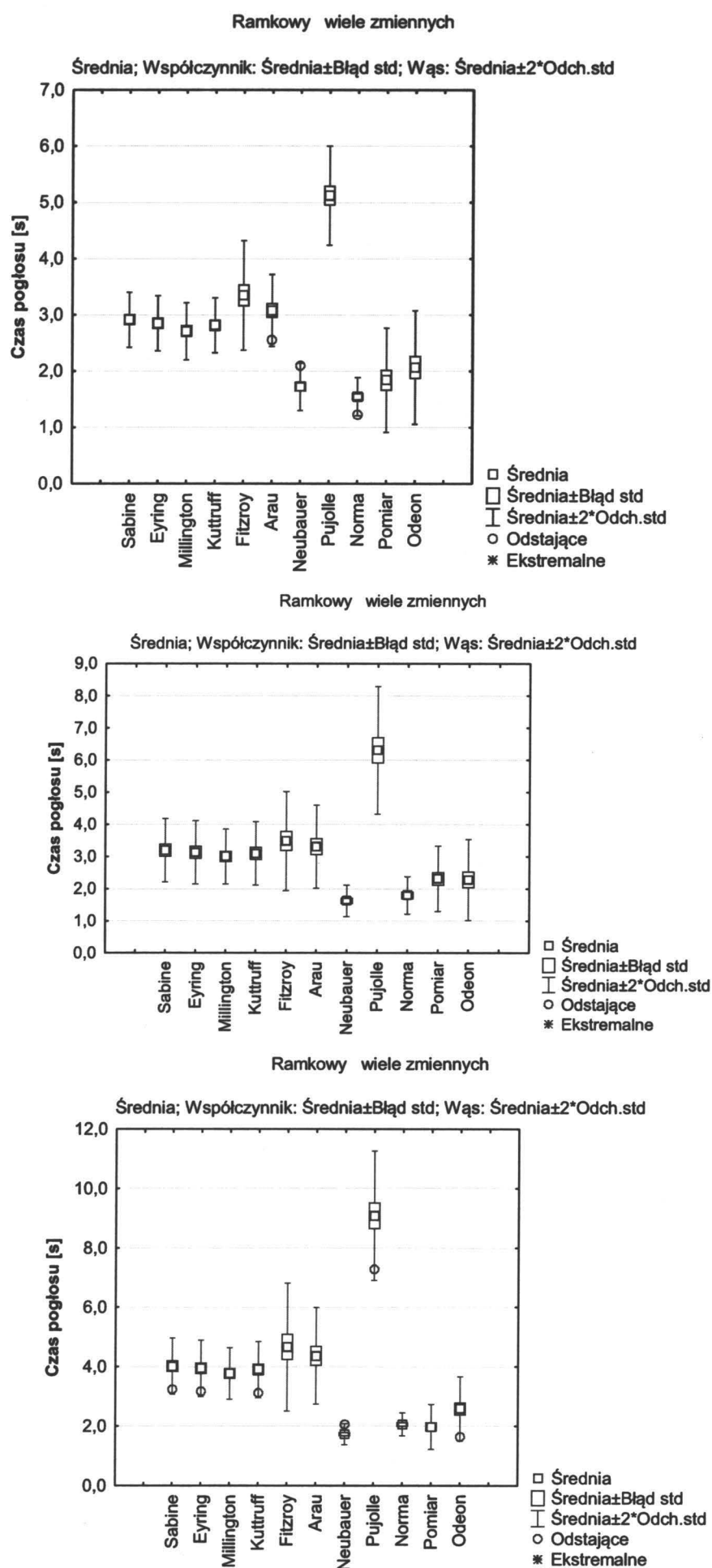
Z powyższych analiz przyjęto dwie grupy wniosków.

1. Pierwsza grupa mówi o przydatności konkretnych wzorów teoretycznych do szacowania czasu pogłosu w pomieszczeniach typu aula.
2. Druga grupa wniosków doprowadziła do opracowania nowej metody szacowania czasu pogłosu, nazwaną „Metoda Minimalizacji Reszt MMR”.

W artykule tym nie będziemy zajmować się drugą grupą wniosków, gdyż stanowi ona opracowany artykuł będący obecnie w recenzji w renomowanym czasopiśmie naukowym.

Natomiast zajmując się pierwszą grupą można na podstawie przedstawionych wyników przypuszczać, że metody Neubauera, normowa oraz symulacje w ODEON dają najlepsze oszacowanie czasu pogłosu dla pomieszczeń typu aula. Dla potwierdzenia tego przypuszczenia przeprowadzono analizę wartości średnich czasu pogłosu ze wszystkich częstotliwości środkowych. Co prawda taka średnia wartość nie odzwierciedla rzeczywistego czasu pogłosu, jednakże cel takiego uśrednienia jest inny. Mianowicie pokazanie zróżnicowania rozkładu czasu pogłosu.

W tym celu wykonano wykresy typu ramka wąsy:



Rys. 4. Wykresy ramka wąsy. Wyniki przedstawione kolejno odpowiadają aulom I, II, III.

Fig. 4. Diagrams of mustache frame. The results presented consecutively correspond to auditoriums I, II, III.

Jak można zauważyć wynik dla metody Pujolle zdecydowanie przeszacowuje wartość rzeczywistą. Wyniki metodą Neubauera, normą i ODEON odzwierciedlają

wynik pomiaru, a pozostałe metody tworzą grupę jednakowych wyników przeszacowujących w jednakowy sposób wynik rzeczywisty.

Wyniki przedstawione graficznie na rysunku 4. potwierdzoną za pomocą testowania hipotez.

$$H_0 : \mu_m = \mu_p$$

$$H_1 : \mu_m \neq \mu_p$$

Za pomocą testu dla prób niezależnych uzyskano wniosek, iż dla średnich wartości Neubaera, normy i ODEON w porównaniu ze średnią wartością pomiaru, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 . Dla pozostałych metod sprawdzaną hipotezę odrzucamy.

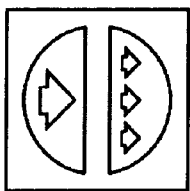
THEORETICAL MODELS OF REVERBERATION TIME IN THE ANALYSIS OF AUDITORIUM PREMISES

Summary: The paper presents the results of theoretical analysis of the reverberation time in three selected auditoriums. Based on the analysis the differences between the models used and measurements in real conditions were determined. Designated differences will be used to develop new methods for estimating the reverberation time.

Literatura

- [1] Arau-Puchades. H.: *An Improved Reverberation Formula*. *Acustica*. 1988, vol. 65, p. 163 – 180.
- [2] Astolfi A., i inni: *Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms*. *Ap. Acoust.* 2008, 69, p. 966 – 976.
- [3] Batko W., Pawlik P.: *Uncertainty Evaluation in Modelling of Acoustic Phenomena with Uncertain Parameters Using Interval Arithmetic*. *ACTA Physica Polonica* A. 2012, vol. 121, No. 1-A, p. 152 – 155 A.
- [4] Beranek L.L.: *Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption*. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2006, 120 (3), p. 1399 – 1410.
- [5] Bradley J.S.: *Optimising sound quality for classrooms*. *Proceedings of XX Meeting of SOBRAC (Brazilian Acoustical Association)*. 2002, p. 1 – 15.
- [6] Carvalho A.: *The use of the Sabine and Eyring reverberation time equation to churches*. 129th meeting of the Acoustical Society of America. 1995.
- [7] Dance S.M., Shield B.M.: *Modeling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces. Part II. Absorptive panels*. *Applied Acoustics*. 2000, 61, p. 373 – 384.
- [8] Gerretsen E.: *Estimation Methods for Sound Levels and Reverberation Time in a Room with Irregular Shape or Absorption Distribution*. *ACTA Acustica United With Acustica*. 2006, vol. 92, p. 797 – 806.

- [9] Iordache V. i inni: *Experimental Investigation of the Reverberation Time Inside a Complex Geometry Indoor Space*. Romanian J. of Ac. and Vib., 2013, vol. X issue 2, p. 109 – 114.
- [10] Kang J., Neubauer R.O.: *Predicting reverberation time: Comparison between analytic formulae and computer simulation*. Proceedings of the 17th International Conference on Acoustics (ICA). 2001.
- [11] Kang J. i inni, *Acoustics in large atrium spaces*. 14th International Congress on Sound and Vibration. 2007
- [12] Kraszewski J.: *Computing Reverberation Time in a 3D Room Model Using a Finite Difference Method Applied for the Diffusion Equation*. Archives of Acoustics. 2012, vol. 37, No. 2, p. 171 – 180.
- [13] Lawrence T.: *The Effect of Partially Diffuse Sound Fields on the Prediction of Absorption Coefficients*. MSc Audio Acoustics Dissertation. 2006.
- [14] Lehmann i inni: *Reverberation-Time prediction method for room impulse responses simulated with the image-source model*. IEEE Workshop on Aplic of Sig. Proc. to Audio and Acoustics. 2007, p. 159 – 162.
- [15] Neubauer R.O., Kostek B.: *Prediction of the Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non-Uniformly Distributed Sound Absorption*. Archives of Acoustics. 2000, vol. 26, No. 3, p. 183 – 201.
- [16] Pujolle J.: *Nouvelle formule pour la durée de réverbération*, Rev. d'Acoust. 1975, 19, p. 107 – 113.
- [17] Skrzypczyk J.: *Metody perturbacyjne. I Nowa metodologia algebraiczna. Zastosowania w mechanice i akustyce*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010. ISBN978-83-7335-720-4.
- [18] Spargo D., Martens W.L., Cabrera D.: *Comparison of Room Acoustic Measurements of Diffuseness with a Theoretical Model*. Proceedings of Acoustics. 2011, p.1 – 5.
- [19] Yasuda Y. i inni: *Experimental and numerical studies on reverberation characteristics in a rectangular room with unevenly distributed absorbers*. Acoustical Science and Technology. 2006, 27, 6, p. 366 – 374.
- [20] Zhang Y.A.: *Method to Predict Reverberation Time in Concert Hall Preliminary Design Stage*. A Dissertation. Georgia 2005.



OKREŚLENIE WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNYCH DLA MODYFIKOWANYCH GEOMETRYCZNIE MATERIAŁÓW IZOLACYJNYCH

Bożena ORLIK-KOŹDOŃ; Tomasz STEIDL

*Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: Bożena.Orlik-Kozdon@polsl.pl; , e-mail: Tomasz.Steidl@polsl.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono pierwszy etap prac zmierzających do uzyskania nowej płyty termoizolacyjnej przeznaczonej do wykonywania ociepleń od strony zewnętrznej w systemach ETICS (*External Thermal Insulation Composite System*). Płyta będzie wykonana ze sztywnych materiałów izolacyjnych i modyfikowana geometrycznie poprzez wykonanie w niej kanałów o zróżnicowanej konfiguracji i kształcie otworów. Projektowane w płycie kanały mają służyć zmniejszeniu ciężaru płyty i ograniczeniu zużycia materiału do jej wykonania. Celem prowadzonej analizy będzie rozpoznanie natury przepływu ciepła w zaprojektowanym komponencie budowlanym w warunkach przepływu niskotemperaturowego oraz zaprojektowanie modelu płyty z taką konfiguracją i kształtem kanałów, dla którego proporcje kosztów wytworzenia do parametrów cieplnych (R -opór cieplny, TE -efektywność cieplna) będą optymalne. Innowacyjne podejście do stworzenia płyt z zaprojektowanymi im-perfekcjami jest chronione zgłoszeniem patentowym Wp. 22285.

Słowa kluczowe: imperfekcje geometryczne, kanałowa płyta izolacyjna, efektywność cieplna, opór cieplny komponentu, materiał do izolacji cieplnej

1. WPROWADZENIE

Na rynku budowlanym mamy szeroki asortyment materiałów do izolacji cieplnej przegród. Różnią się one między sobą rozwiązaniami materiałowymi, ale łączy je wszystkie niski współczynnik przewodności cieplnej. Obecnie producenci materiałów budowlanych poszukują coraz to bardziej nowoczesnych – i przede wszystkim-tanich rozwiązań, które pozwoliłyby na osiągnięcie równie wysokiej efektywności cieplnej jak tradycyjne materiały izolacyjne.

W swojej pracy Autorzy proponują nowatorskie rozwiązanie w postaci kanałowej płyty do izolacji cieplnej

wykonanej ze sztywnych materiałów izolacyjnych typu polistyren EPS, XPS, pianka PIR, PUR [17].

W zastosowaniach praktycznych spotkać już można modyfikacje geometryczne płyt- materiałów izolacyjnych [10,11]. Jako bliższy przykład można podać płyty klimatyczne EPS [13]. Zastosowane w nich perforacje polegają na wykonaniu mikrootworów równoległych do kierunku przepływu ciepła. Rozwiązanie ma na celu poprawę parametrów dyfuzyjnych materiału z Zachowaniem wysokich standardów cieplnych płyt. Wykorzystywane są one w tradycyjnych systemach etics. W większości przypadków jednak modyfikacje geometryczne materiałów budowlanych służą poprawie cech akustycznych i znajdują powszechne zastosowanie w izolacjach dźwiękowych. [12,14,15,16]

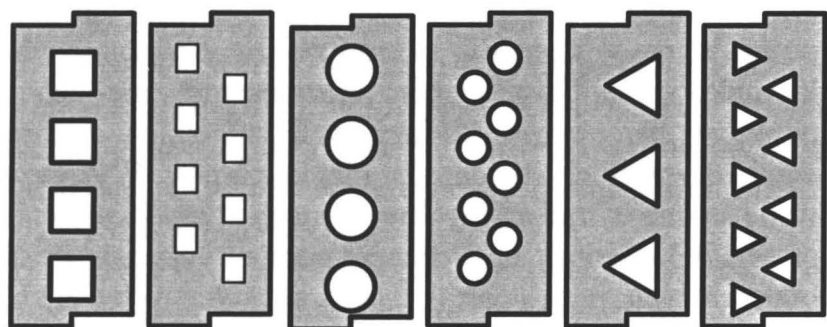
Autorka w swoim pomysle bazowała na własnych doświadczeniach [5] jak również na badaniach postawionych w pracach [1,2,3]. Przedstawione tam rozważania dotyczą głównie elementów o dużej przewodności cieplnej takich jak np. betony lub ceramika z zaprojektowanym zaburzeniami w postaci szeregu otworów wypełnionych powietrzem lub wkładkami z materiałów o bardzo dobrej izolacyjności cieplnej.

Modyfikacje geometryczne płyt, nazywane przez autorkę również imperfekcjami stanowią celowe zaburzenie geometrii materiału izolacyjnego o pozytywnym charakterze, mającym na celu uzyskanie oszczędności materiału z równoczesnym niepogorszeniem parametrów fizyczno-mechanicznych powstałego komponentu. Przedmiotem analizy jest typowa płyta sztywna z materiału termoizolacyjnego [17] z zaprojektowanymi imperfekcjami geometrycznymi w postaci kanałów usytuowanych poziomo lub pionowo do długości płyty w jednym lub kilku rzędach.

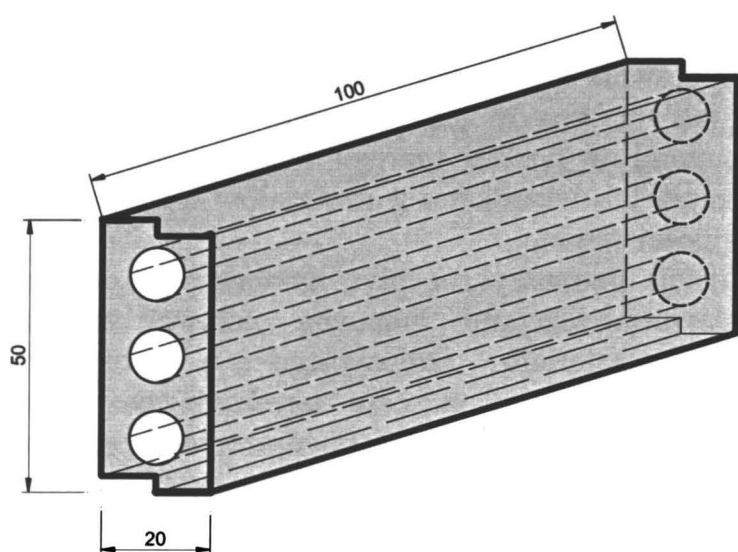
W referacie przedstawiono wyniki obliczeń wpływu kształtu, rozmieszczenia w przekroju płyty i pola powierzchni modyfikacji geometrycznych, nazwanych imperfekcjami, na parametry cieplne komponentu tj opór cieplny R.

2. PROPONOWANE MODYFIKACJE GEOMETRYCZNE DLA MATERIAŁÓW SZTYWNYCH

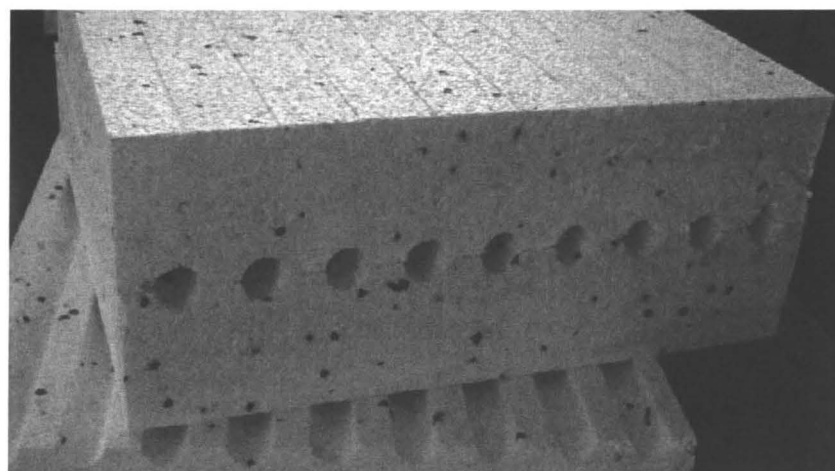
Przedmiotem analiz jest płyta prostokątna do wykonywania izolacji cieplnej ścian budynku. W płycie zaprojektowano otwory o wstępnie wybranych przekrojach: kołowym, trójkątnym o krawędziach ostrych i zaokrąglonych, oraz o przekroju w postaci wieloboku z różną konfiguracją rozmieszczenia kanałów: w jednym lub kilku rzędach poziomych równoległe do długości płyty oraz pionowych. (rys.1, 2, 3). Do dalszej analizy wybrano płyty z otworami usytuowanymi w jednym rzędzie, symetrycznie w stosunku do kształtu płyty. Obliczenia wykonano dla płyty z różnymi wariantami kształtów kanałów tj: kwadrat, trójkąt oraz koło ustawionych w jednym rzędzie. Dodatkowo przyjęto, iż całkowite pole powierzchni otworów nie będzie większe niż 40% całkowitej powierzchni przekroju. Wybrane kształty służą wyłącznie analizie poznawczej.



Rys.1. Wybrane przykłady imperfekcji płyty kanałowej, przekrój
Fig. 1 Selected examples of imperfection of channel plate, horizontal section



Rys.2. Przykład geometrii płyty kanałowej z wybraną imperfekcją w przekroju: z kanałami poziomymi w jednym rzędzie
Fig. 2. Examples of channel plate's geometry with chosen imperfection in cross-section with horizontal channels in a single row



Rys.3. Przykład prototypu płyty
Fig.3. Example, prototype boards

3. ZAŁOŻENIA PRZYJĘTE DO ANALIZY

Do analizy przyjęto płytę o grubości 20cm z kanałami ułożonymi poziomo w jednym i dwóch rzędach. Dla celów porządkowych wprowadza się następujące oznaczenia płyty : imperfekcje o kształcie kwadratu: M_KW, trójkąta równobocznego: M_T, koła: M_K. Symbol np. M_K_3 imperfekcję o przekroju koła o średnicy 3cm lub M_KW(T)_3: wielokąt (kwadrat, trójkąt) o boku 3cm.

Dla każdego modelu wymiary imperfekcji były dobrane w kilku wariantach, tak aby sumaryczna ich powierzchnia w przekroju płyty nie była większa niż 40% (konieczność zachowania parametrów wytrzymałościowych płyt-przedmiot dalszych badań). Ułożenie otworów było zgodne z osią symetrii płyty z równoczesnym zachowaniem odległości 5cm od podłużnej krawędzi płyty. Analizę prowadzono przy założeniu, że kanały wypełnione są powietrzem i stanowią szczelinę ograniczoną (zamknięcie kanałów folia) o emisyjności ścianek $\varepsilon = 0.9$. Rozpatrzono również przypadek, w którym powierzchnia kanałów jest pokryta cienką warstwą materiału o niskim współczynniku absorpcji promieniowania niskotemperaturowego $\varepsilon = 0.1$. Rozważono dwa ułożenia płyty: pionowe i poziome. Dla tak zaprojektowanej płyty wykonano obliczenia: całkowitego oporu cieplnego płyty i gęstości strumienia ciepła. Dla zaprojektowanych imperfekcji określono wpływ przyjętej powierzchni kanałów na intensyfikację ruchu konwekcyjnych z wykorzystaniem liczby Nusselta. Liczba Nusselta charakteryzuje intensywność wymiany ciepła, powodowanej konwekcją swobodną w stosunku do czystego przewodzenia. Kanały potraktowano, jako szczelinę, w której występuje złożona wymiana ciepła obejmująca promieniowanie i konwekcję. Zjawisko to opisane zostało wielkością k_{eff} . (wzór nr 1).

Obliczenia wykonano przy użyciu programu Therm 7.2. Program ten oparty jest na wykorzystaniu MES do obliczeń przepływu ciepła dla dowolnego dwuwymiarowego modelu geometrycznego.

Do obliczeń przyjęto następujące warunki brzegowe:

- temperatury obliczeniowe – jak dla stacji meteo Katowice $t_e = -2,4^{\circ}\text{C}$,
- temperaturę środowiska wewnętrznego dla normalnych warunków eksploatacji $t_i = +20^{\circ}\text{C}$,
- współczynniki przejmowania ciepła $h_e = 25,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; $h_i = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$,
- współczynnik absorpcji promieniowania $\varepsilon = 0.9$ dla wariantu_1 i $\varepsilon = 0.1$ dla wariantu_2.

Na potrzeby obliczeń przyjęto, że materiałem izolacyjnym będzie polistyren ekspandowany o współczynniku przewodności cieplnej $\lambda = 0.038 \text{ [W/mK]}$.

4. OPIS ROZPATRYWANYCH ZJAWISK

Dla rozpatrywanych płyt kanałowych ich efektywność cieplna zależy między innymi od rodzaju materiału izolacyjnego jak również od rodzaju gazu wypełniającego przestrzeń, kanałów. Strumień ciepła przepływający przez tego typu izolację jest sumą składowych strumienia ciepła przepływającego przez promieniowanie, przewodzenie jak i konwekcję przez wypełniający gaz, oraz na skutek przewodzenia przez element stały [4,9]. W swojej pracy autorzy uwagę poświęcili głównie złożonej wymianie ciepła, która ma miejsce w zamkniętych, ograniczonych szczelinach powietrznych. Dla potrzeb analizy wprowadzono założenie, że gęstość strumienia ciepła jest równa sumie gęstości strumienia ciepła przekazywanego przez konwekcję i promieniowanie. W przypadku konwekcji opis wnikania ciepła w przestrzeni ograniczonej jest skomplikowany z uwagi na małe rozmiary rozpatrywanej powierzchni. W większości spotykanych w literaturze opisów, badacze posługują się zależnościami wyznaczonymi empirycznie [8,9]. Autorzy założyli, że na obecnym etapie badań ruchu powietrza w przestrzeni imperfekcji opisany jest efektywnym współczynnikiem k_{eff} [W/mK] a w opisie zjawisk intensyfikację wymiany ciepła opisywać będzie liczba Nusselta . [6]

$$k_{eff} = (h_{cv} + h_r) \cdot d \quad (1)$$

gdzie:

h_{cv} -konwekcyjny współczynnik transportu ciepła [W/(m²K)]

h_r -radiacyjny współczynnik transportu ciepła [W/(m²K)]

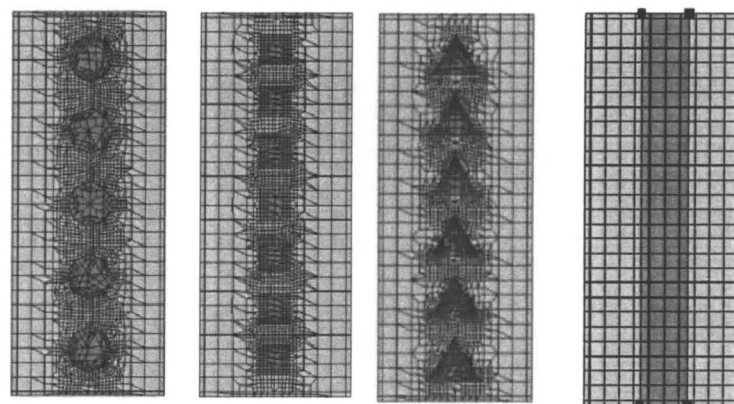
d - grubość warstwy (szczeliny) [m]

Uzyskana wielkość k_{eff} została wykorzystana przez autorów do obliczenia ekwiwalentnego oporu cieplnego przy ocenie efektywności cieplnej płyty.

Przedstawiony w pracy model transportu ciepła w komponencie ma charakter uproszczony i jest modelem wstępnym, który zostanie zweryfikowany w oparciu o wyniki badań empirycznych.

5. WYNIKI OBLICZEŃ I ICH ANALIZA

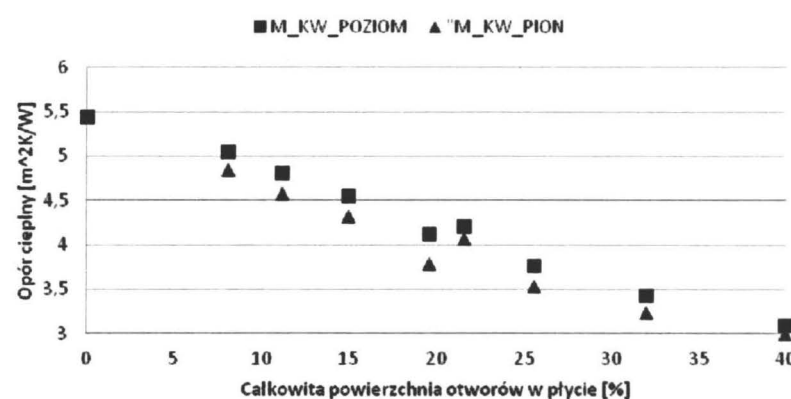
Cały zakres badań nad konfiguracją i geometrią otworów podzielono na etapy. W pierwszym określono zależność parametrów cieplnych od kierunku ułożenia i wielkości kanałów. Obliczono liczbę Nusselta $Nu=f(Ra)$ oraz wielkość k_{eff} . [6] Za podstawowy cel wstępnej analizy uznano uzyskanie zależności między oporem cieplnym a polem powierzchni przekroju imperfekcji, pozwalającej na optymalizację ich wymiarów w stosunku do całkowitej powierzchni płyty. Uzyskane wyniki pozwoliły w dalszej części badań przyjąć zasadniczy kierunek ułożenia kanałów, oraz modele podstawowe dla trzech kształtów geometrycznych jak na rys. 4.



Model M_K Model_M_KW Model M_T M_(K;KW;T)_Pion

Rys.4. Modele podstawowe płyty z zaznaczoną siatką MES przyjęte do analizy

Fig.4 Basic models of the slab accepted for analysis with FEA mesh



Rys.5. Zależność oporu cieplnego od całkowitej powierzchni imperfekcji w płycie

Fig.5 Dependence of thermal resistivity on the total area of imperfections in the slab

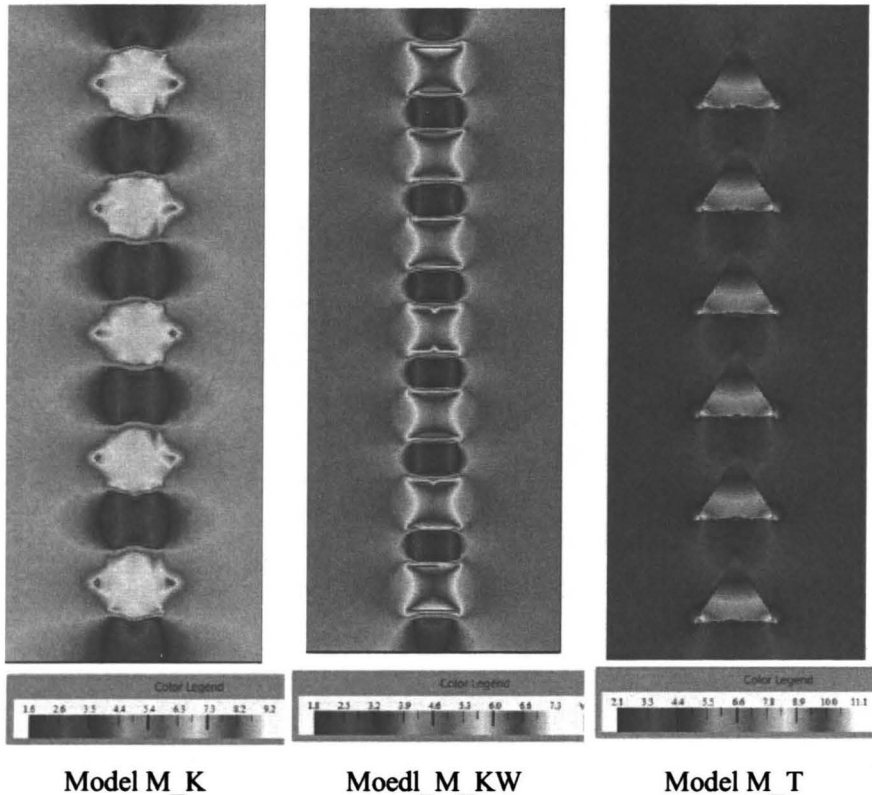
Z obliczeń, dla których wyniki prezentowane są na rys. nr 5 wynika, że konfiguracja kanałów w kierunku poziomym jest korzystniejsza w kontekście efektywności cieplnej

Opór cieplny płyt z kanałami poziomymi równoległymi do jej dłuższego boku jest w granicach od 0.35 do 0.25

[m²K/W] większy od oporu cieplnego płyty z kanałami pionowymi.

Do dalszej analizy przyjęto płyty z kanałami poziomymi równoległymi do osi dłuższej płyty. Analizowano następujące kształty: koło, kwadrat oraz trójkąt.

Obliczenia prowadzono dla dwóch warunków emisyjności powierzchni brzegów kanału tj. wariant_1: $\varepsilon=0,9$ (oznaczenia M_K; M_KW; K_T) oraz w wariantie_2: $\varepsilon=0,1$ (oznaczenia: M_K_E; M_KW_E; M_T_E).

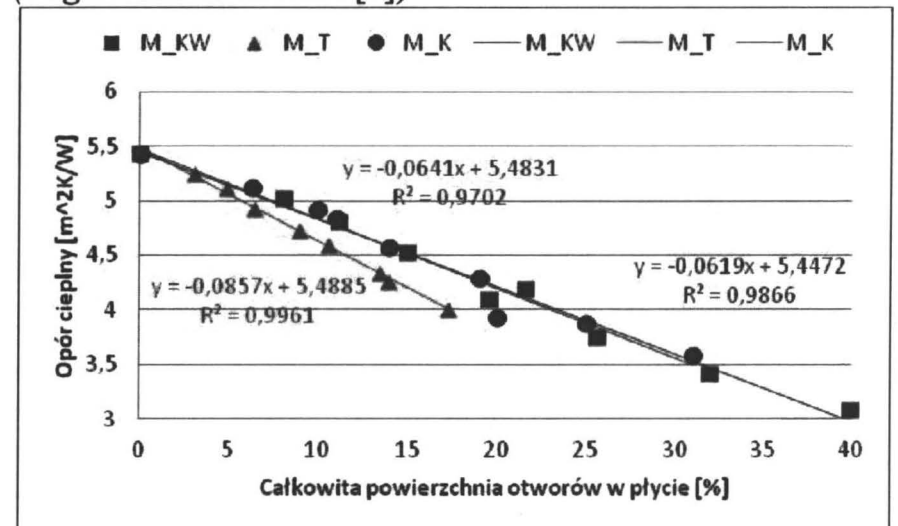


Rys.6. Wizualizacja rozkład gęstości strumienia ciepła dla wybranych modeli.

Fig.6 Visualization of the distribution of heat flux density for the selected models

Analizując wyniki uzyskane dla wariantu, w którym przyjęto współczynnik emisyjności promieniowania $\varepsilon=0,9$, obserwujemy, że najkorzystniejszą modyfikacją geometryczną pod względem parametrów cieplnych jest koło (rys.7.). Stwierdzono niewielkie różnice w wynikach obliczeń oporu cieplnego dla tej formy modyfikacji oraz kwadratu. Intuicyjnie sądzić by można, że koło jest figurą korzystniejszą w kontekście procesów przepływu ciepła niż kwadrat. Dodać w tym miejscu należy, że przy modelowaniu procesów przepływów w kanale dla kształtów innych niż koło przyjmowany jest simpleks geometryczny tj. jeżeli przekrój nie jest kołowy przyjmuje się średnicę zastępczą, co również nie jest bez znaczenia w prowadzonych analizach. Wątpliwości rozwiane zostaną w trakcie badań laboratoryjnych w aparacie płytowym i skrzynce grzejnej (wybór obu metod podyktowany jest różną konfiguracją otworów w płycie: pion, poziom; oraz zastosowaniem

osłony kanałów w postaci materiału niskoemisyjnego (Pogorzelski et al. 2007[7])



Rys. 7. Zależność oporu cieplnego od całkowitej wielkości imperfekcji w płycie dla emisyjności ścianek równej 0.9

Fig.7 Dependence of thermal resistivity on the total area of imperfections in the slab for the emissivity of walls equal to 0.9

Korzystając z obliczonych wartości oporu cieplnego i znanej wartości pola powierzchni dopasowano wstępnie funkcje liniowe. Funkcje te nie posiadają wyraźnego ekstremum.

Wydają się one być jednak dobrym sposobem opisu złożonych zjawisk w komponencie z uwagi na wysoki współczynnik korelacji powyżej 0.9. Autorzy na podstawie uzyskanej funkcji liniowej proponują do opisu oporu cieplnego modyfikowanych płyt zależność w postaci:

$$R_m = R_p - \eta \cdot A_f \quad (2)$$

gdzie:

R_m – opór modyfikowanej płyty [m²K/W]

R_p – opór płyty pełnej [m²K/W]

η – współczynnik kształtu: dla kwadratu 0.062; koła 0.064; trójkąta 0.086

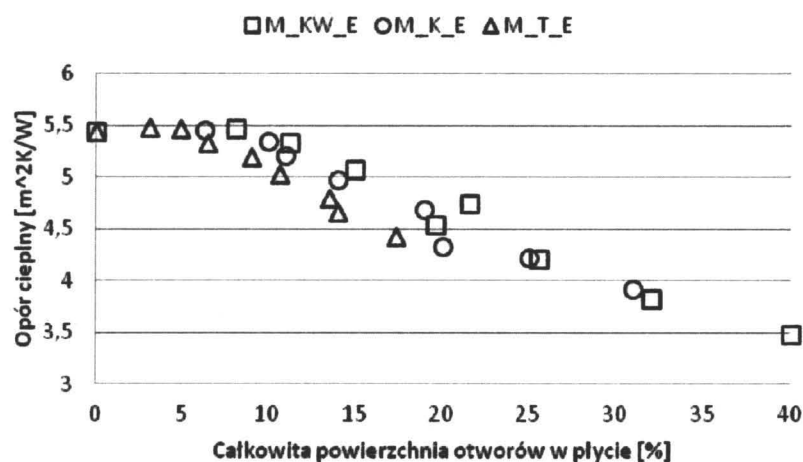
A_f – powierzchnia otworów w płycie [%]

Powyższa zależność prawdziwa jest tylko w przypadku określonej konfiguracji i kształtów otworów. Nie bez znaczenia jest również materiał osnowy, którego przewodność cieplna musi być nie większa niż 0.06 [W/mK].

Do pomiarów rzeczywistego oporu ciepła w aparacie płytowym i skrzynce grzejnej wstępnie wytypowane zostaną próbki, których obliczeniowy opór cieplny nie jest mniejszy niż 4.5 [m²K/W].

W wariantie drugim, dla którego emisyjność, ścianek kanału wynosiła 0.1 w sposób zdecydowany można zauważyć poprawę jakości cieplnej płyt wyrażonej poprzez wzrost wartości oporu cieplnego (rys.8). Najkorzystniejsza zmiana oporu cieplnego R , występuje dla imperfekcji w kształcie kwadratu. Dla wszystkich kształtów zmniejszyła się wartość k_{eff} , ujmująca w tym wariantie

głównie zjawisko konwekcji z niewielkim wpływem radiacji.[6]



Rys. 8. Zależność oporu cieplnego od całkowitej wielkości imperfekcji w płycie dla emisyjności ścianek równej 0.1
Fig.8 Dependence of thermal resistivity on the total size of imperfections in the slab for the emissivity of walls equal to 0.1.

6. UWAGI KRYTYCZNE I PODSUMOWANIE

Obliczenia numeryczne wykonywane za pomocą programów komputerowych opartych o metodę elementów skończonych zawierają tak zwany błąd metody. Przedstawione w artykule obliczenia wykonywano zakładając w programie Therm 7.2., błąd równy, co do wartości końcowej wyniku nie więcej niż 2,0 %. Nie analizowano wpływu parametrów siatki MES, na rzeczywisty błąd obliczeniowy, przyjmując, iż będzie on taki sam dla wszystkich rozpatrywanych przypadków. Dla materiałów o niskim współczynniku przewodzenia ciepła λ [W/mK] i wysokim oporze cieplnym $R > 5$ [m²K/W], błąd ten może mieć pewne znaczenia na wynik końcowy. Działanie takie zostanie wykonane przy kolejnych dokładniejszych obliczeniach. Zdaniem autorów, małe znaczenie na liczbowy wynik obliczeń ma sam proces przygotowania modelu geometrycznego i niedokładności obliczeń z tym związane.

W analizach wstępnych, które przedstawia prezentowany referat, nie uwzględniono sprzężonych zjawisk cieplno-wilgotnościowych, skupiając się głównie na obliczeniach cieplnych. Obliczenia pomijają możliwości zmian parametrów cieplnych powietrza wypełniającego kanały zakładając, iż dla wszystkich rozpatrywanych przypadków założono takie same warunki brzegowe III - go rodzaju.

Celem autorów jest opracowanie modelu płyty z taką konfiguracją i kształtem kanałów, dla którego proporcje kosztów wytworzenia do oporu cieplnego będą optymalne, a w założeniu niższe niż dla płyty pełnej. Projektowane w płycie kanały mają służyć zmniejszeniu ciężaru płyty i ograniczeniu zużycia materiału do jej wykonania. Autorzy rozważają możliwość zróżnicowania emisyjności powierzchni materiału osnowy otaczającej kanały, co powinno korzystnie wpłynąć, na jakość cieplną płyty.

Związane jest to jednak z możliwościami technologicznymi wytworzenia takich parametrów na powierzchni wewnętrznej kanałów. Działania takie nie były jednak przedmiotem prezentowanych analiz i obliczeń. Zastosowanie płyt kanałowych o odpowiedniej grubości pozwoli na obniżenie kosztów ponoszonych na ogrzewanie, z jednoczesnym obniżeniem ciężaru i kosztów wytwarzania płyt termoizolacyjnych. Zaprezentowane obliczenia są pierwszym etapem prac zmierzających do uzyskania płyt termoizolacyjnych, które mogą być wykorzystane do zabudowy od strony zewnętrznej w technologii etics (*external thermal insulaion composite system*). Innowacyjne podejście do stworzenia płyt z zaprojektowanymi imperfekcjami jest chronione zgłoszeniem patentowym nr Wp. 22285. Autorzy prezentując pomysł na nowy komponent budowlany oczekują również komentarzy, co do słuszności i celowości zastosowania takiej formy izolacji cieplnej. Uzyskane wyniki motywują autorów do dalszej analizy i weryfikacji przyjętego modelu przepływu w oparciu o badania laboratoryjne.

DEFINING THERMAL CHARACTERISTICS FOR GEOMETRICALLY MODIFIED INSULATION MATERIALS

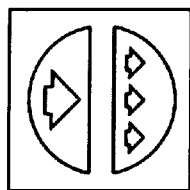
Summary:

The article presents the first part of research intended to establish a new thermo-insulation plate that would be used for insulating walls externally by means of ETICS (External Thermal Insulation Composite System). The plate will be made of stiff insulating materials and modified geometrically by making tunnels of different configuration and holes shapes. These tunnels will serve to diminish the plate weight and reduce the amount of material necessary for its production. The aim of such analysis is to determine the nature of heat flow in a designed building component in conditions of low-temperature flow as well as designing a model of a plate with such a configuration and tunnel shape where the cost of making with reference to heat parameters (R – thermal resistance, TE thermal effectiveness) is optimal. Innovative approach to building plates with imperfections is protected by patent Wp. 22285.

LITERATURA

1. Górzyński J.: *Przemysłowe izolacje cieplne*, Wydawnictwo Sorus S.C, Poznań 1996.
2. Griffith B., Turler D., Arasteh D.: *Optimizing the effective conductivity and cost of gas filled panel thermal insulations*, Proceedings of the 22nd

- International Thermal Conductivity Conference, Arizona State University, November 1993.
3. Kosny, J. and J.E. Christian: *The optimum use of insulation for concrete masonry block foundations*, Building Research Journal 2(2), November 1993.
 4. Kostowski E.: *Przepływ ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
 5. Orlik-Koźdoń B., Ślusarek J.: *The process of heat and dampness movement In building Partitions*; Monography 292, The Silesian University of Technology 2010.
 6. Orlik B. Steidl T.: Analiza wpływu im perfekcji geometrii przekroju materiału termoizolacyjnego na jego parametry cieplne, Monografi, Wybrane zagadnienia budownictwa energooszczędnego, Politechnika Warszawska Płock 2014, str. 115-125.
 7. Pogorzelski J.A, Firkowicz –Pogorzelska K.: *Thermal resistance of air spacer with surface coated by low emissivity film*, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2007.
 8. Sadik Kakac, Yaman Yener: *Convective heat transfer*, Second Edition, CRC Press 1995.
 9. Theodore L.Bergman, Adrienne S.Lavine, Frank P.Incropera, David P.Dewitt: *Fundamentals of heat and mass transfer*, Wiley and Sons 2007.
 10. Urban B.; Engelmann P.; Kossecka E. *Arranging Insulation for Better Thermal Resistance In Concrete and Masonry Wall Systems*, 9th Nordic Symposium on Building Physics – NBS 2011, Volum 3.
 11. Van Geem, M.G. *Thermal transmittance of concrete block walls with core insulation*, Journal of Thermal Insulation Vol. 9, January 1986.
 12. William J. Cavanaugh, Gregory C.Tocci; Joseph A. Willes: *Architectural Acoustic. Principles and Practice*, John&Sons, 2010.
 13. ETA-05/0061 Baunit open-Die KlimaFassade.
 14. www.durasystems: Durasteel Acoustic Absorption Panel
 15. www.envirotech-acoustic.com; Saund Absorption Wooden Perforated Acoustic Panel.
 16. www.muranoacoustic.com.eu: Murano Acoustic Panels – Wood by Gerald Hynes.
 17. Wzór patentowy Kanałowa płyta izolacyjna Wp.22285



WPLYW ZYSKÓW CIEPŁA OD PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO NA WARTOŚĆ WSKAŹNIKA NIEODNAWIALNEJ ENERGII PIERWOTNEJ W BUDYNKU

Anna ŻYCZYŃSKA*, Grzegorz DYŚ**

** Politechnika Lubelska, Katedra Konserwacji Zabytków
ul. Nadbystrzycka 40; 20-618 Lublin; e-mail: a.zyczynska@pollub.pl*

*** Energetyczna Pracownia Inżynierska ERG s.c.
ul. Głęboka 10 lok. 35; 20-612 Lublin; e-mail: grzegorz.dys@erg.lublin.pl*

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono analizę zmian wartości wskaźnika rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną (EP_{H+W} – potrzeby na ogrzewanie, wentylację i przygotowanie ciepłej wody) dla przykładowego budynku wielorodzinnego z tytułu zysków ciepła od nasłonecznienia elementów oszklonych. Budynek został przyporządkowany do wybranej stacji meteorologicznej. Celem przeprowadzonej analizy było oszacowanie stopnia wpływu tych zysków na wartość wskaźnika EP_{H+W} . W obliczeniach uwzględniono różny stopień przeszklenia przegród budowlanych, różne usytuowanie budynku względem kierunków świata. Wariantowo przyjęto współczynnik przepuszczalności energii promieniowania słonecznego przez powierzchnie oszklone oraz współczynnik redukcyjny z tytułu zacielenia od przeszkód zewnętrznych. Obliczenia charakterystyki energetycznej wykonano zgodnie z obowiązującymi przepisami jak dla budynku nie wyposażonego w instalację chłodzenia. Założono, że budynek zasilany jest z miejskiej sieci ciepłowniczej i spełnia wymagania przepisów techniczno-budowlanych w zakresie izolacyjności cieplnej przegród oraz instalacji ogrzewczej i ciepłej wody.

Słowa kluczowe: zyski ciepła od promieniowania, bilans zapotrzebowania na ciepło, wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną, charakterystyka energetyczna budynku

1. WPROWADZENIE

Zgodnie z wymaganiami zawartymi w warunkach technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie obowiązującymi od dnia 1 stycznia 2014 r. [8] maksymalna wartość wskaźnika rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną dla budynku wielorodzinnego nie wyposażonego w instalację chłodzenia wynosi 105 kWh/m^2 , natomiast od 1 stycznia 2017 r. będzie

wynosiła 85 kWh/m^2 , a od 1 stycznia 2021 r. 65 kWh/m^2 . Wskaźnik EP_{H+W} zawiera potrzeby budynku na energię na cele ogrzewania, wentylacji oraz przygotowania ciepłej wody. Określenie jego wartości rozpoczęto od obliczenia zapotrzebowania na energię użytkową, następnie na końcową i pierwotną, a uzyskane wyniki odniesiono do jednostkowej powierzchni użytkowej ogrzewanej budynku. Zyski ciepła z tytułu nasłonecznienia elementów oszklonych są elementem bilansu zapotrzebowania budynku na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji oraz do chłodzenia, co ostatecznie wpływa na charakterystykę energetyczną budynku. Stopień ich wykorzystania ma szczególne znaczenie w całorocznym bilansie cieplnym budynku o niskim zapotrzebowaniu na energię [4], [5]. Pożądane w okresie zimy ciepło promieniowania staje się niepożądane w okresie letnim [4]. Zyski te mają duży wpływ na niedotrzymywanie komfortu cieplnego w pomieszczeniach w okresie letnim szczególnie w budynkach energooszczędnych [4]. W okresie letnim dąży się do ograniczenia tych zysków np. poprzez montowanie różnego rodzaju osłon zewnętrznych [1]. Natomiast w okresie ogrzewania ich wykorzystanie redukuje straty ciepła, jednak ważne są relacje pomiędzy zyskami a stratami z tytułu przenikania przez powierzchnie elementów oszklonych. Zużycie energii w budynku w dużej mierze zależy od przeszkłonych i przezroczystych elementów elewacji [3]. Wielkość zysków od promieniowania jest zależna również od lokalizacji i orientacji budynku co ostatecznie wpływa szczególnie na zapotrzebowanie na energię budynku niskoenergetycznego [6]. Wpływ zysków w przypadku budownictwa tradycyjnego nie jest tak odczuwalny [5]. Przy obliczaniu zapotrzebowania na ciepło w przypadku budynków o niskim zapotrzebowaniu na

energię zasadne wydaje się stosowanie metody symulacyjnej o większym stopniu złożoności, w której krok obliczeniowy jest znacznie krótszy np. jedna godzina niż w przypadku metody bilansowej dla której krokiem obliczeniowym jest miesiąc [2], [4]. Celem przeprowadzonej analizy było oszacowanie stopnia wpływu zysków ciepła z tytułu nasłonecznienia elementów przeszklonych na wskaźnik EP_{H+W} w budynku o standardowych parametrach izolacyjności ciepłej przegród oraz instalacji ogrzewczej i przygotowania ciepłej wody. Obliczenia zostały wykonane metodą bilansową zgodnie z metodologią zawartą w przepisach [9].

1.1. Opis budynku

Analizie został poddany istniejący budynek mieszkalny wielorodzinny, dla którego założono trzy różne stopnie przeszklenia przegród zewnętrznych, tj. rzeczywisty – wyższy niż dopuszczony przez wymagania techniczne (P.1), zbliżony do maksymalnego (P.2) oraz zbliżony do minimalnego (P.3), które są określone w wymaganiach [8]. Przeanalizowano budynek w kształcie prostopadłościanu o współczynniku kształtu $0,40 \text{ m}^{-1}$, całkowicie podpiwniczony (piwnice nieogrzewane), z pomieszczeniami ogrzewanymi do temperatur normowych, wyposażony w instalację ogrzewczą i ciepłej wody zgodnie z wymaganiami warunków technicznych oraz w indywidualny dwufunkcyjny węzeł cieplny zasilany z miejskiej sieci ciepłowniczej, dla której źródło ciepła stanowi elektrociepłownia pracująca w kogeneracji. Założono dla poszczególnych rodzajów przegród budowlanych współczynniki przenikania ciepła spełniające obecne wymagania w zakresie izolacyjności cieplnej, tj. dla ścian zewnętrznych – $0,249 \text{ W/m}^2\text{K}$, stropodachu – $0,199 \text{ W/m}^2\text{K}$, stropu nad piwnicą – $0,249 \text{ W/m}^2\text{K}$, okien i drzwi balkonowych – $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, drzwi w przegrodach zewnętrznych – $1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. W tabeli 1 podano charakterystyczne parametry budynku.

Tabela 1. Charakterystyka budynku.

Table 1. The characteristics of the building.

Lp.	Parametr budynku	Symbol	Jednostka	Wartości		
				P.1	P.2	P.3
1	Wymiary budynku (dług. × szer. × wys.)	-	m	40,9 m × 9,9 m × 15,8 m		
2	Powierzchnia zabudowy	P_{zab}	m^2	408,0		
3	Kubatura całkowita	$V_{cał.}$	m^3	6905,0		
4	Liczba klatek schodowych	-	szt.	3		
5	Kubatura ogrzewana	V	m^3	4563,2		
6	Powierzchnia o regulowanej temperaturze	A_r	m^2	1810,8		

7	Powierzchnia użytkowa	A	m^2	1629,3		
8	Liczba kondygnacji	n	-	5		
9	Lokalizacja okien	-	-	pionowo; w ścianach zewnętrznych podłużnych		
10	Sumaryczna powierzchnia oszklona	A_p	m^2	503,1	381,6	239,8
11	Powierzchnia ścian zewnętrznych wraz z oknami	A_z	m^2	1371,60		
12	Stopień przeszklenia	p	%	36,7	27,8	17,5
13	Ruchome elementy zacinające	-	-	nie występują		
14	Udział powierzchni oszklona w całkowitej powierzchni okien, drzwi	C	-	0,7		
15	Jednostkowe zyski wewnętrzne	q_{int}	W/m^2	6,5		
16	Średnia sezonowa sprawność całkowita systemu ogrzewania	$\eta_{H,tot}$	-	0,793		
17	Średnia sezonowa sprawność całkowita systemu ciepłej wody	$\eta_{W,tot}$	-	0,686		
18	Współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla ciepła sieciowego z kogeneracji	$W_H; W_W$	-	0,8		
19	Współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla energii elektrycznej	W_{el}	-	3		
20	Lokalizacja	-	-	stacja meteorologiczna Zamość (strefa o wysokich wartościach energii promieniowania słonecznego)		

2. METODYKA OBLICZEŃ

Analizę wykonano w oparciu o metodologię obliczania charakterystyki energetycznej budynku posługując się metodą miesięczną wg [9]. Budynek został zlokalizowany w Zamościu. Wielkości natężenia promieniowania dla stacji meteorologicznej Zamość podano w tabeli 3. Dla każdego przyjętego stopnia przeszklenia P.1, P.2 i P.3 zmianie podlegały trzy parametry, tj. ustawienie budynku względem kierunków świata, przepuszczalność energii promieniowania słonecznego dla części przezroczystej okien oraz czynnik redukcyjny ze względu na zacinienie od przeszkód zewnętrznych.

Do obliczeń miesięcznych zysków ciepła od promieniowania słonecznego wykorzystano zgodnie z rozporządzeniem [9] zależność (1):

$$Q_{sol,H} = C \cdot A \cdot I \cdot F_{sh,gl} \cdot F_{sh} \cdot g \quad (1)$$

gdzie:

C – udział powierzchni oszklona w całkowitej powierzchni okien, drzwi [-]

A – powierzchnia okien, drzwi w świetle otworu w przegrodzie [m^2]
 I – energia promieniowania słonecznego w miesiącu wg danych klimatycznych (tabela 3) [$kWh/(m^2 \cdot m \cdot c)$]
 $F_{sh,gl}$ – czynnik redukcyjny na zacinienie z tytułu ruchomych elementów zacieniających [-]
 F_{sh} – czynnik redukcyjny na zacinienie od przeszkód zewnętrznych [-]
 g – całkowita przepuszczalność energii promieniowania słonecznego dla powierzchni oszklonej [-]
 Zgodnie z [7] i [9] zyski ciepła od promieniowania słonecznego są, obok ilości ciepła przenoszonego przez przenikanie i wentylację oraz wewnętrznych zysków ciepła, jednym ze składników zapotrzebowania budynku na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji. Zgodnie z [9] roczne zapotrzebowanie budynku na energię użytkową po uwzględnieniu sprawności całkowitej systemu ogrzewania pozwala na obliczenie energii końcowej, co następnie po doliczeniu energii pomocniczej i przyjęciu odpowiedniego współczynnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej umożliwia wyznaczenie rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną dla systemu ogrzewania. Poniższe zależności (2), (3), (4), (5) obrazują metodę postępowania przy obliczeniach wg [9].

$$Q_{H,nd} = \sum (Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn}) \quad (2)$$

gdzie:

$Q_{H,nd}$ – roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji [kWh/rok]
 $Q_{H,ht}$ – całkowita ilość ciepła przenoszonego ze strefy ogrzewanej w n-tym miesiącu roku [$kWh/m \cdot c$]
 $\eta_{H,gn}$ – współczynnik wykorzystania zysków ciepła w strefie ogrzewanej w n-tym miesiącu roku wyznaczony zgodnie z [1]
 $Q_{H,gn}$ – całkowite zyski ciepła w strefie ogrzewanej w n-tym miesiącu roku [$kWh/m \cdot c$]

$$Q_{k,H} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_{H,tot}} \quad (3)$$

gdzie:

$Q_{k,H}$ – roczne zapotrzebowanie na energię końcową dla systemu ogrzewania [kWh/rok]
 $\eta_{H,tot}$ – średnia sezonowa sprawność całkowita systemu ogrzewania [-]

$$\eta_{H,tot} = \eta_{H,g} \cdot \eta_{H,d} \cdot \eta_{H,e} \cdot \eta_{H,s} \quad (4)$$

gdzie:

$\eta_{H,g}$ – średnia sezonowa sprawność wytwarzania ciepła
 $\eta_{H,d}$ – średnia sezonowa sprawność przesyłu ciepła
 $\eta_{H,e}$ – średnia sezonowa sprawność regulacji i wykorzystania ciepła w przestrzeni ogrzewanej
 $\eta_{H,s}$ – średnia sezonowa sprawność akumulacji ciepła w elementach pojemnościowych systemu ogrzewania

$$Q_{p,H} = Q_{k,H} \cdot w_H + E_{el,pom,H} \cdot w_{el} \quad (5)$$

gdzie:

$Q_{p,H}$ – roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną dla systemu ogrzewania [kWh/rok]
 w_H – współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii lub energii dla systemu ogrzewania [-]
 $E_{el,pom,H}$ – roczne zapotrzebowanie na energię pomocniczą końcową dostarczaną dla systemu ogrzewania [kWh/rok]
 w_{el} – współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie energii elektrycznej [-]

Wyznaczenie wskaźnika rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną (EP_{H+W}) dla budynku mieszkalnego bez instalacji chłodzenia wymaga konieczności określenia nie tylko potrzeb cieplnych związanych z ogrzewaniem, ale również potrzeb cieplnych wynikających z konieczności przygotowania ciepłej wody w budynku. Zależności (6), (7), (8), (9), (10), (11), obrazują metodę postępowania przy obliczeniach wg [9].

$$Q_{w,nd} = \frac{V_{wi} \cdot A_f \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot (\theta_w - \theta_0) \cdot k_R \cdot t_R}{3600} \quad (6)$$

gdzie:

V_{wi} – jednostkowe dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową [$dm^3/(m^2 \cdot dzień)$]
 A_f – powierzchnia pomieszczeń o regulowanej temperaturze powietrza [m^2]
 c_w – ciepło właściwe wody – $4,19 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$
 ρ_w – gęstość wody – 1 kg/dm^3
 θ_w – obliczeniowa temperatura ciepłej wody użytkowej w zaworze czerpalnym – $55 \text{ }^\circ\text{C}$
 θ_0 – obliczeniowa temperatura wody przed podgrzaniem – $10 \text{ }^\circ\text{C}$
 k_R – współczynnik korekcyjny ze względu na przerwy w użytkowaniu ciepłej wody użytkowej [-]
 t_R – liczba dni w roku – 365 dni

$$Q_{k,w} = \frac{Q_{w,nd}}{\eta_{w,tot}} \quad (7)$$

gdzie:

$Q_{k,w}$ – roczne zapotrzebowanie na energię końcową dla systemu przygotowania ciepłej wody [kWh/rok]
 $\eta_{w,tot}$ – średnia sezonowa sprawność całkowita systemu przygotowania ciepłej wody [-]

$$\eta_{w,tot} = \eta_{w,g} \cdot \eta_{w,d} \cdot \eta_{w,e} \cdot \eta_{w,s} \quad (8)$$

gdzie:

$\eta_{w,g}$ – średnia sezonowa sprawność wytwarzania ciepła
 $\eta_{w,d}$ – średnia sezonowa sprawność przesyłu ciepła
 $\eta_{w,e}$ – średnia sezonowa sprawność wykorzystania ciepła (przyjmuje się 1,0)

$\eta_{w,s}$ – średnia sezonowa sprawność akumulacji ciepła w elementach pojemnościowych systemu przygotowania ciepłej wody

$$Q_{p,w} = Q_{k,w} \cdot w_w + E_{el,pom,w} \cdot w_{el} \quad (9)$$

gdzie:

$Q_{p,w}$ – roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną dla systemu przygotowania ciepłej wody [kWh/rok]

w_w – współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii lub energii dla systemu przygotowania ciepłej wody [-]

$E_{el,pom,w}$ – roczne zapotrzebowanie na energię pomocniczą końcową dostarczaną dla systemu przygotowania ciepłej wody [kWh/rok]

$$Q_p = Q_{p,H} + Q_{p,w} \quad (10)$$

$$EP_{H+W} = \frac{Q_p}{A_f} \quad (11)$$

2.1. Założenia do obliczeń

Obliczenia wykonano odrębnie dla każdego stopnia przeszklenia budynku P.1, P.2 i P.3 zakładając zmianę poszczególnych parametrów wg danych zamieszczonych w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie parametrów przyjętych do obliczeń.

Table 2. The summary of parameters adopted for calculations.

Lp.	Nazwa i opis parametru	Symbol	Wartość
1	Usytuowanie wejść do budynku względem kierunku świata	północ	N
		wschód	E
2	Całkowita przepuszczalność energii promieniowania słonecznego dla powierzchni oszklonej	oszklenie podwójne	0,75
		oszklenie potrójne	0,70
		oszklenie potrójne z dwoma selektywnymi niskoemisyjnymi powłokami	0,50
3	Czynnik redukcyjny na zacinienie od przeszkód zewnętrznych przyjęto średni dla budynku w okresie ogrzewania	budynek na otwartej przestrzeni, brak zacinienia	1,0
		budynek w otoczeniu budynków o zbliżonej wysokości	0,95
		budynek w centrum miasta	0,90
4	Czynnik redukcyjny z tytułu na zacinienie od elementów ruchomych	brak elementów ruchomych	$F_{sh,gl}$

Całkowite miesięczne natężenie promieniowania dla stacji meteorologicznej w Zamościu podano w tabeli 3.

Tabela 3. Natężenie promieniowania dla stacji meteorologicznej w Zamościu.

Table 3. Irradiance for the weather station in Zamosc.

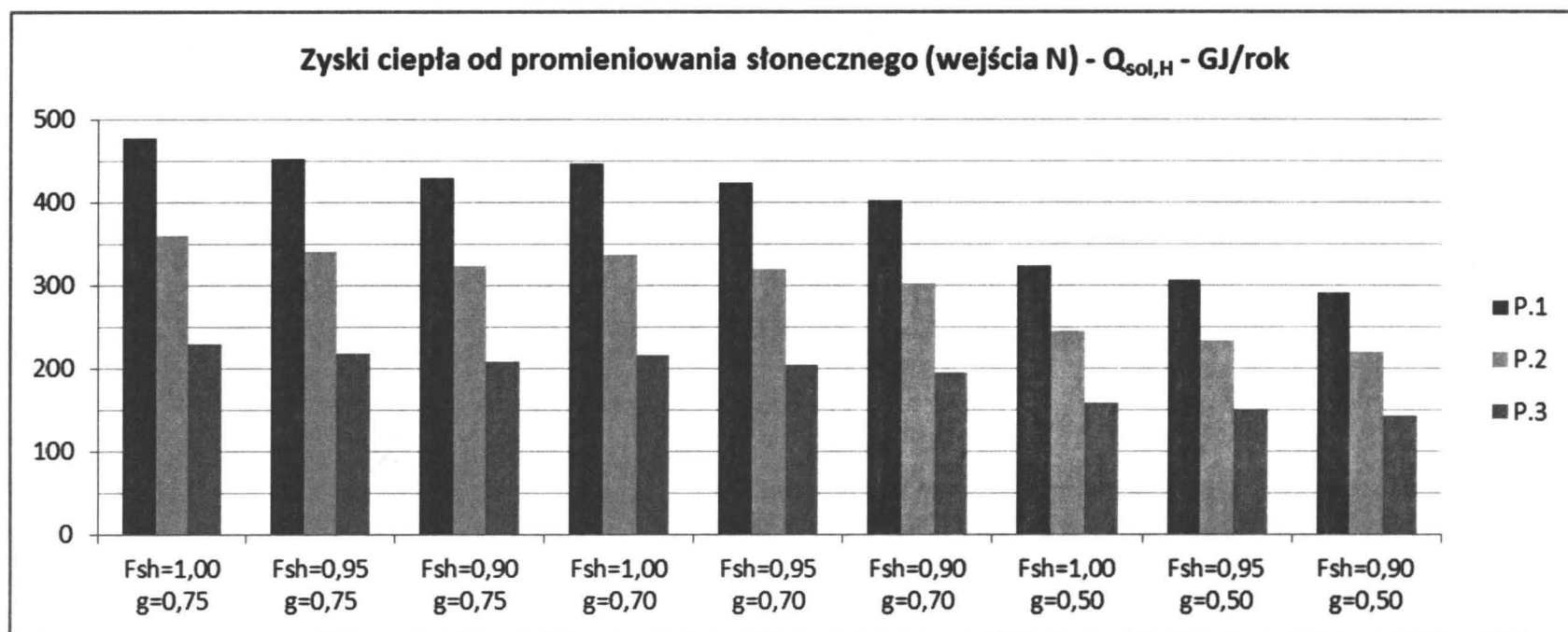
Lp.	Miesiąc	Wartość natężenia promieniowania [Wh/m ²]			
		N	S	E	W
1	Styczeń	20663	46070	24202	23496
2	Luty	24754	42302	28778	27503
3	Marzec	48181	86858	66399	60387
4	Kwiecień	70550	88856	82929	80363
5	Maj	89259	117093	119574	121015
6	Czerwiec	100331	116780	134130	117901
7	Lipiec	101669	120427	129680	120603
8	Sierpień	79457	119781	112028	106438
9	Wrzesień	60451	91280	76942	74154
10	Październik	34581	67812	42597	42603
11	Listopad	19633	38693	22652	22929
12	Grudzień	18924	32177	20004	19932

3. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ

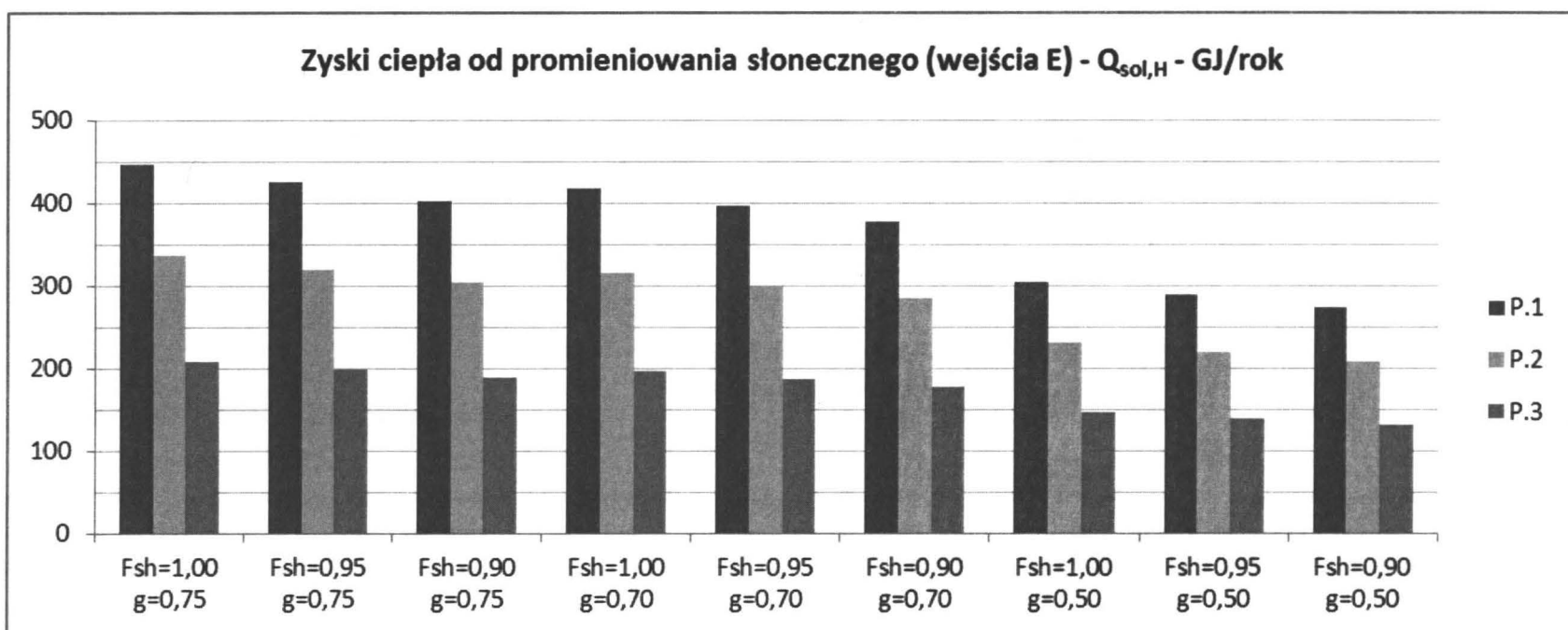
Uzyskane w różnych wariantach wyniki obliczeń poddano analizie pod względem określenia zmiany zysków od promieniowania słonecznego, zmiany struktury zapotrzebowania budynku na energię użytkową oraz wpływu poszczególnych parametrów na wartość wskaźnika EP_{H+W} dla budynku, co przedstawiono na rysunkach od Rys. 1 do Rys. 11.

3.1. Bilans energii użytkowej

Na Rys. 1 i Rys. 2 przedstawiono dla każdej wartości przeszklenia P.1, P.2 i P.3 i parametrów podanych na osi poziomej, odpowiednio dla usytuowania budynku N-S i E-W wartości zysków ciepła od promieniowania słonecznego. Natomiast tylko dla usytuowania N-S na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono ulegające zmianom wielkości bilansu energii użytkowej (straty z tytułu przenikania – Q_D , zyski od promieniowania słonecznego – $Q_{sol,H}$, energia użytkowa – $Q_{H,nd}$). Rys. 3 sporządzono dla $g = 0,75$, Rys. 4 dla $g = 0,75$, a Rys. 5 dla $g = 0,50$. Dla każdego wariantu wartości niektórych składników bilansu są takie same i wynoszą: roczne wewnętrzne zyski ciepła 227,63 GJ/rok, zapotrzebowanie z tytułu wentylacji 394,71 GJ/rok, straty przez przenikanie do przestrzeni nieogrzewanych 28,57 GJ/rok.



Rys. 1. Zyski ciepła od promieniowania słonecznego – usytuowanie N-S.
Fig. 1. Heat gain from solar radiation – North-South location.

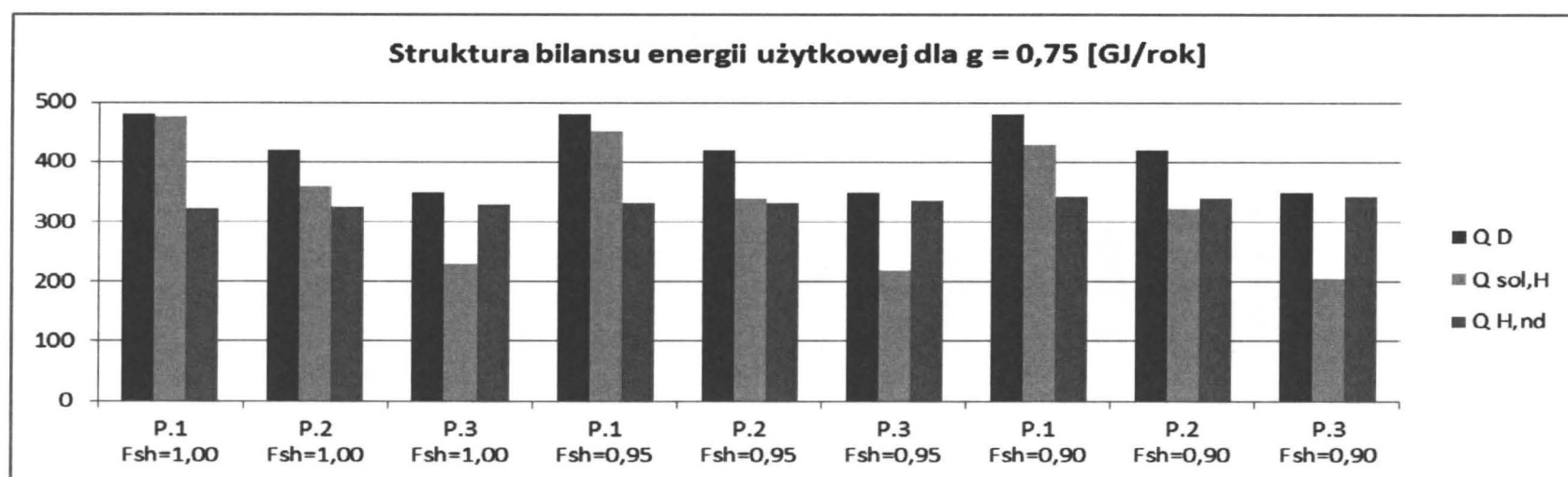


Rys. 2. Zyski ciepła od promieniowania słonecznego – usytuowanie E-W.
Fig. 2. Heat gain from solar radiation – East-West location.

Różnice wartości zysków ciepła od promieniowania słonecznego w zależności od wariantu są znaczne i przy stopniu przeszklenia P.1 maleją od 476,8 GJ/rok do 273,7 GJ/rok, przy P.2 od 359,3 GJ/rok do 207,9 GJ/rok, natomiast przy P.3 od 229,9 GJ/rok do 130,9 GJ/rok, tj. ok. 40% w przypadku każdego stopnia przeszklenia.

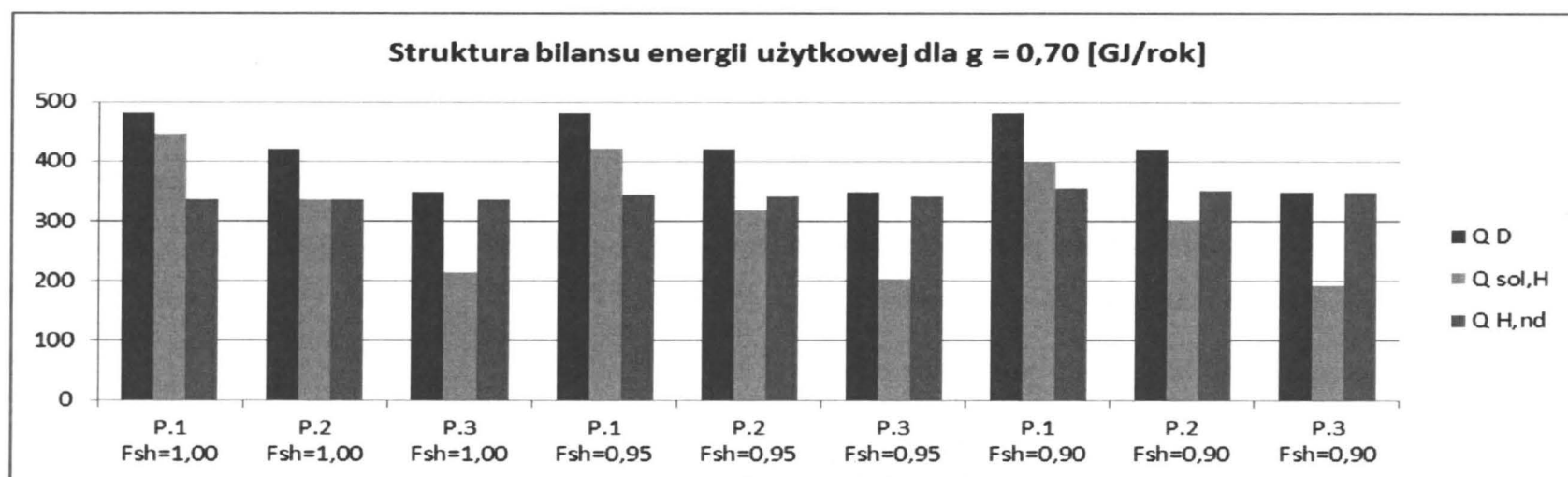
Z analizy uzyskanych wyników struktury bilansu energii użytkowej na kierunku N-S wynika, że pomimo występującego dużego spadku zysków ciepła od promieniowania energia użytkowa wzrasta w mniejszym

stopniu. I tak, przy uzyskanych skrajnych wartościach, dla przeszklenia P.1 o 27,5 %, dla P.2 o 22,6 % i dla P.3 16,2 %. Wykresy wskazują na wzrost zysków ciepła od promieniowania słonecznego przy rosnącym stopniu przeszklenia, ale równocześnie wówczas następuje wzrost strat ciepła z tytułu przenikania przez okna i drzwi. Jest to oczywiście spowodowane znacznie większymi współczynnikami przenikania ciepła okien i drzwi niż ścian zewnętrznych.



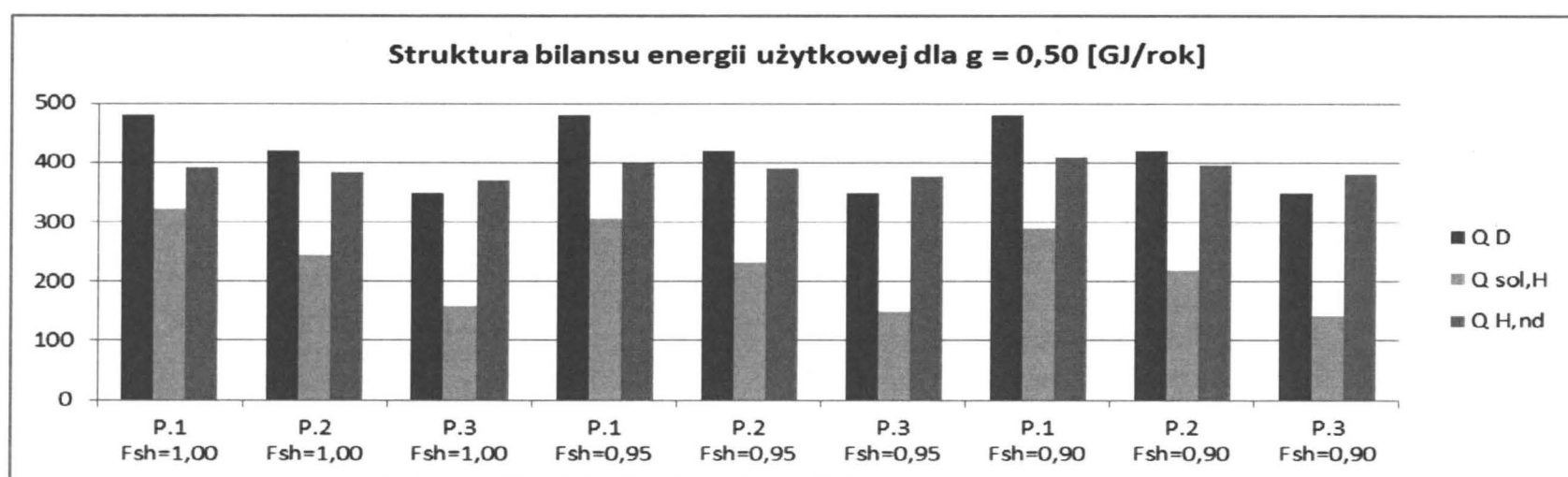
Rys. 3. Struktura bilansu energii użytkowej dla $g = 0,75$ (usytuowanie N-S).

Fig. 3. Structure of usable energy balance for $g = 0,75$ (North-South location).



Rys. 4. Struktura bilansu energii użytkowej dla $g = 0,70$ (usytuowanie N-S).

Fig. 4. Structure of usable energy balance for $g = 0,70$ (North-South location).



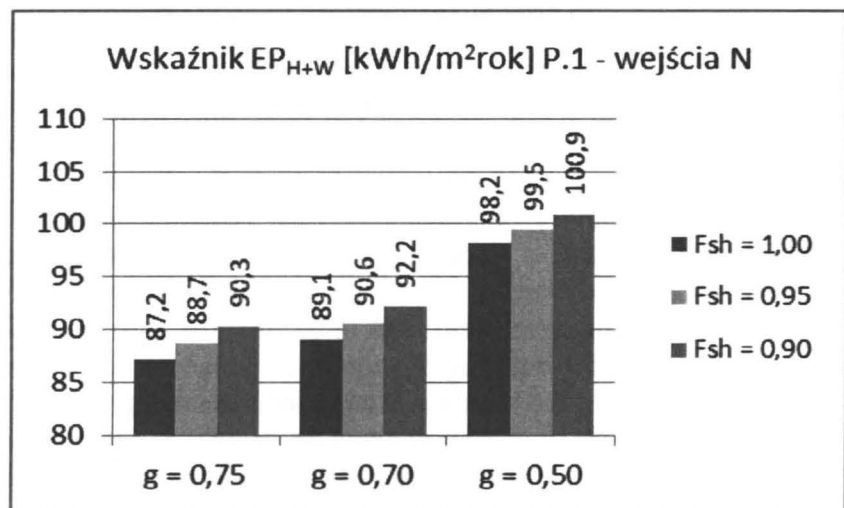
Rys. 5. Struktura bilansu energii użytkowej dla $g = 0,50$ (usytuowanie N-S).

Fig. 5. Structure of usable energy balance for $g = 0.50$ (North-South location).

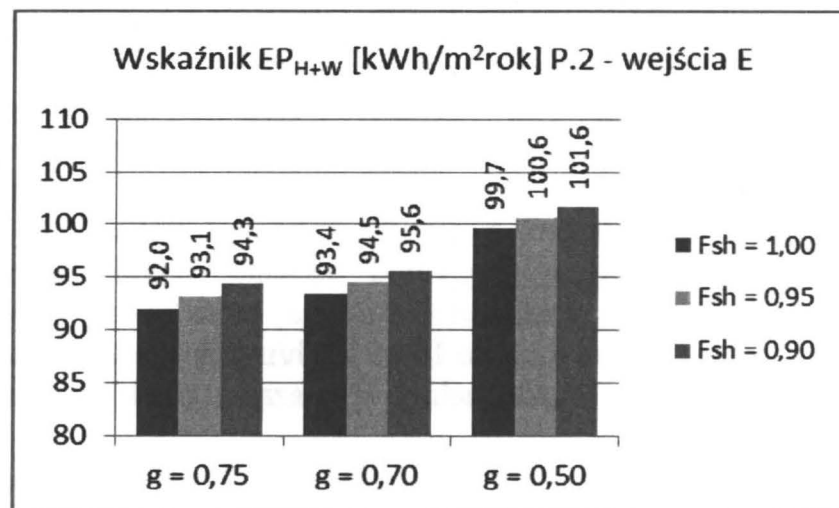
3.2. Wartość wskaźnika EP_{H+W}

Wykresy na rysunkach od Rys. 6 do Rys. 11 przedstawiają zmianę wartości wskaźnika EP_{H+W} w zależności od

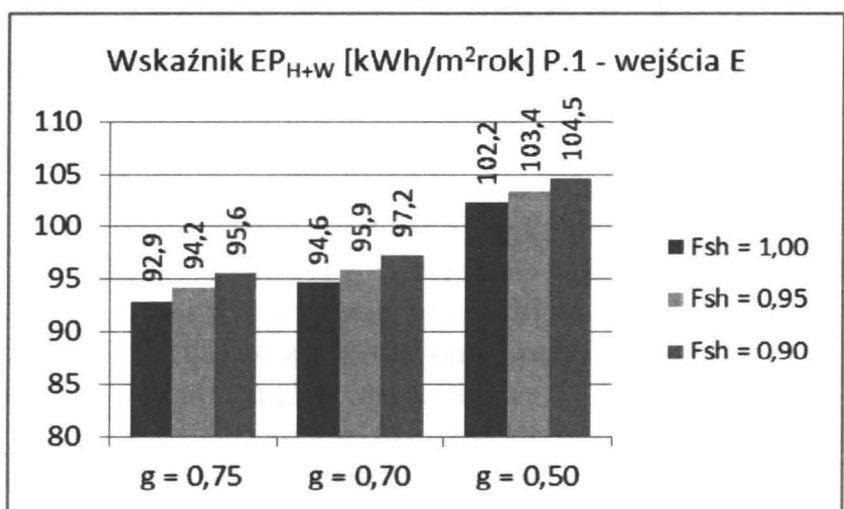
zmienności wartości trzech wcześniej opisanych parametrów mających wpływ na wielkość zysków ciepła od promieniowania.



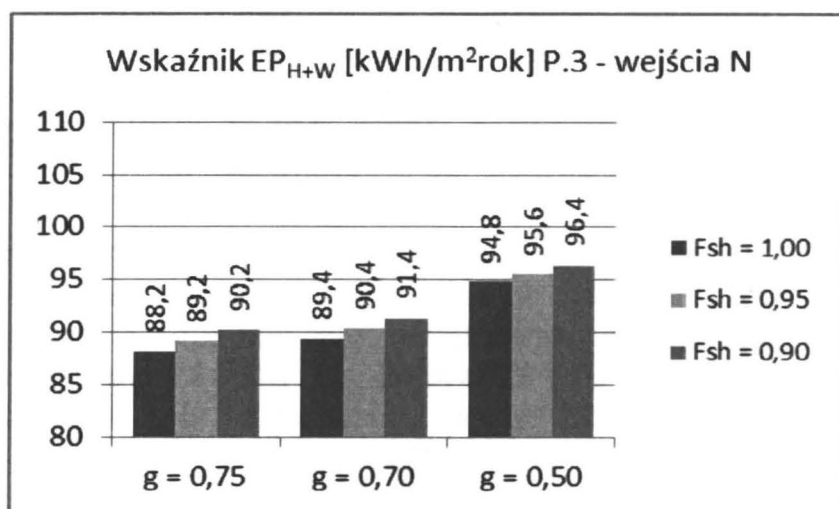
Rys. 6. Wskaźnik EP_{H+W} dla P.1 przy kierunku N-S.
Fig. 6. EP_{H+W} factor for P.1 – North-South direction.



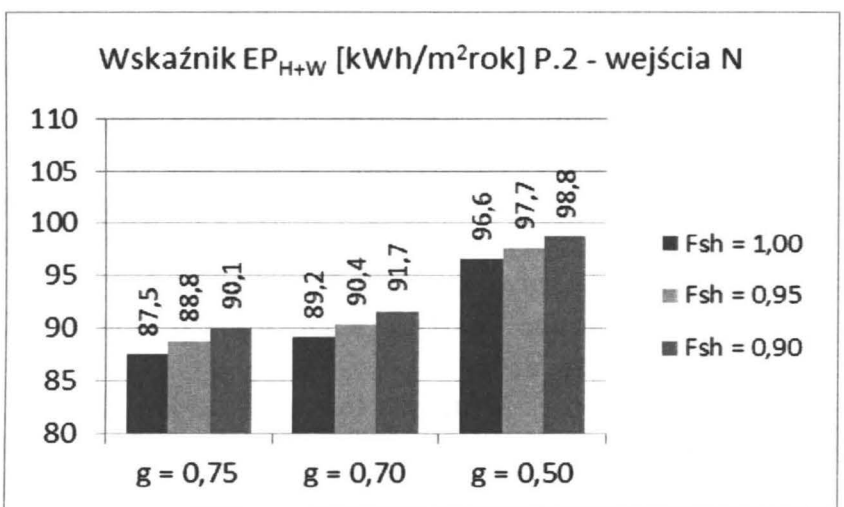
Rys. 9. Wskaźnik EP_{H+W} dla P.2 przy kierunku E-W.
Fig. 9. EP_{H+W} factor for P.2 – East-West direction.



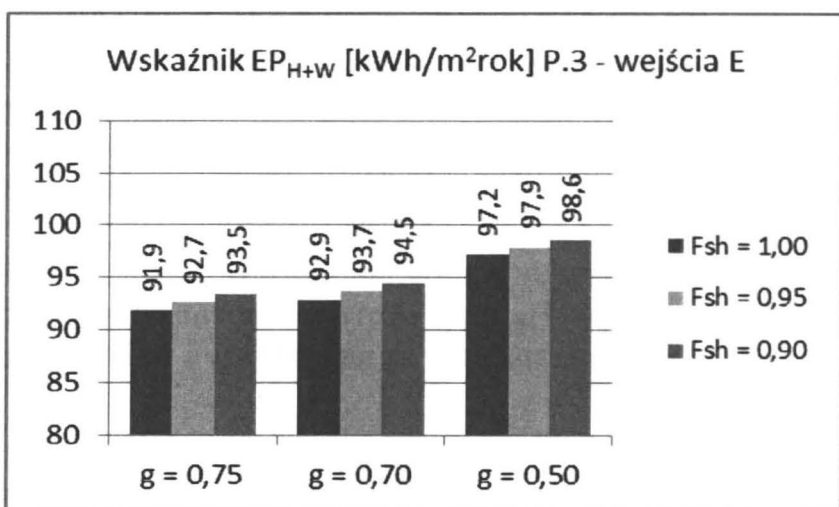
Rys. 7. Wskaźnik EP_{H+W} dla P.1 przy kierunku E-W
Fig. 7. EP_{H+W} factor for P.1 – East-West direction



Rys. 10. Wskaźnik EP_{H+W} dla P.3 przy kierunku N-S.
Fig. 10. EP_{H+W} factor for P.3 – North-South direction.



Rys. 8. Wskaźnik EP_{H+W} dla P.2 przy kierunku N-S
Fig. 8. EP_{H+W} factor for P.2 – North-South direction



Rys. 11. Wskaźnik EP_{H+W} dla P.3 przy kierunku E-W
Fig. 11. EP_{H+W} factor for P.3 – East-West direction

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeanalizowanych wyników obliczeń uzyskanych dla wybranego budynku spełniającego wymagania przepisów technicznych w zakresie izolacyjności cieplnej przegród budowlanych i przyporządkowanego do stacji meteorologicznej Zamość należącej do strefy o najwyższych wartościach całkowitego napromieniowania słonecznego można sformułować następujące wnioski:

- przy założonych wysokich średnich sezonowych sprawnościach całkowitych dla systemu ogrzewania i systemu przygotowania ciepłej wody oraz zasilaniu budynku ciepłem sieciowym z kogeneracji w każdym rozpatrywanym przypadku budynek spełnia wymagania w zakresie wartości EP_{H+W} , która zawiera się w przedziale od 87,2 do 104,5 kWh/m²rok i jest mniejsza od wartości maksymalnej wynoszącej 105 kWh/m²rok wg [2],
- przy zmianie stopnia przeszklenia dla danej wartości F_{sh} oraz usytuowaniu budynku na N-S zyski ciepła od promieniowania słonecznego przy $g = 0,75$ i $g = 0,70$ równoważą wzrost strat z tytułu przenikania przez przegrody zewnętrzne, co powoduje, że różnica w energii użytkowej zmienia się w przedziale od -2,1 % do +1,5 %; natomiast przy $g = 0,50$ zyski w mniejszym stopniu kompensują wzrost strat, a różnica energii użytkowej zmienia się w przedziale od +2,5 % do +7,0 %,
- zmiana stopnia przeszklenia ścian zewnętrznych od 27,8 % (P.2) do 17,5 % (P.3) oraz zakładanych pozostałych parametrów powoduje zmianę wartość EP_{H+W} od 87,5 kWh/m²rok do 101,6 kWh/m²rok, co stanowi 16,1 % w odniesieniu do uzyskanej najmniejszej wartości EP_{H+W} ,
- w analizowanym przypadku dla P.2. i P.3 największy wpływ na EP_{H+W} przy założonych pozostałych parametrach ma współczynnik g zmieniający się od 0,75 do 0,50, wówczas wartości EP_{H+W} różnią się pomiędzy sobą w przedziale od 5,5 % do 10,4 %,
- w analizowanym przypadku dla P.2 i P.3 różnice pomiędzy wartościami EP_{H+W} z tytułu zmiany usytuowania budynku względem kierunków świata przy różnych wielkościach pozostałych parametrów wahają się od 2,3 % do 5,1 %,
- różnice pomiędzy wartościami EP_{H+W} przy P.2. i P.3 z tytułu zmiany F_{sh} przy różnych wariantach wielkości pozostałych parametrów są najmniejsze i wahają się od 1,4 % do 3,0 %.

EFFECT OF HEAT GAIN FROM SOLAR RADIATION ON THE VALUE OF NON-RENEWABLE PRIMARY ENERGY FACTOR

Summary: This paper presents an analysis of changes in the factor of annual demand for non-renewable primary energy (EP_{H+W} - the need for heating, ventilation and hot water) for heat gains from the sun glazed elements of an example of a multi-family building. The building has been assigned to the selected weather station. The aim of the analysis was to assess the impact of these gains on the value of factor EP_{H+W} . The calculations take into account different degrees of glazing of building partitions, different location of the building in relation to the directions of the world. A permeability coefficient of solar radiation through the glazed surfaces and a reduction factor due to shading from external obstacles were alternatively assumed. Energy performance calculations were performed in accordance with applicable regulations as for the building not equipped with a cooling system. It was assumed that the building is supplied from a district heating network and meets the requirements of technical and building regulations in the field of thermal insulation of partitions, heating system and hot water.

Literatura

- [1] Alawadhi E. M. *Using phase change materials in window shutter to reduce the solar heat gain*. Energy and Buildings 47 (2012) 421-429
- [2] Grudzińska M. *Zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu mieszkalnym – porównanie metody bilansowej i symulacyjnej*. Przegląd Budowlany 2/2013 34-38
- [3] Grynning S., Gustavsen A., Time B., Jelle B. P. *Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers?* Energy and Buildings 61 (2013) 185-192
- [4] Jadwiszczak P. *Całoroczny bilans cieplny budynku energooszczędnego*. Rynek Instalacyjny 4/2013, 29-32
- [5] Jadwiszczak P. *Wpływ otoczenia na bilans energetyczny energooszczędnego*. Rynek Instalacyjny 5/2013, 61-64
- [6] Kurtz-Orecka K., Najder M. *Lokalizacja i orientacja budynku niskoenergetycznego a zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i wentylacji*. Rynek Instalacyjny 7-8/2014, 30-34
- [7] PN-EN ISO 13790: 2009 – *Energetyczne właściwości użytkowe budynków - Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia*.
- [8] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 13.08.2013 r. poz. 926).
- [9] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. z 18.03.2015 r., poz. 376).

ISSN 1734-4891