

INSTYTUT FIZYKI BUDOWLI KATARZYNA I PIOTR KLEMM S.C.

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

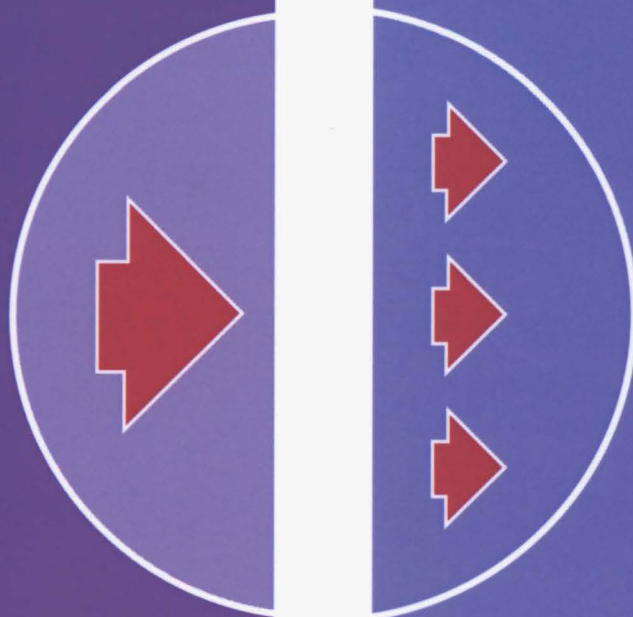
BIBLIOTEKA GŁÓWNA
POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ

P.

M-681 68

FIZYKA BUDOWLI
W TEORII I PRAKTYCE

BUILDING PHYSICS
IN THEORY AND PRACTICE



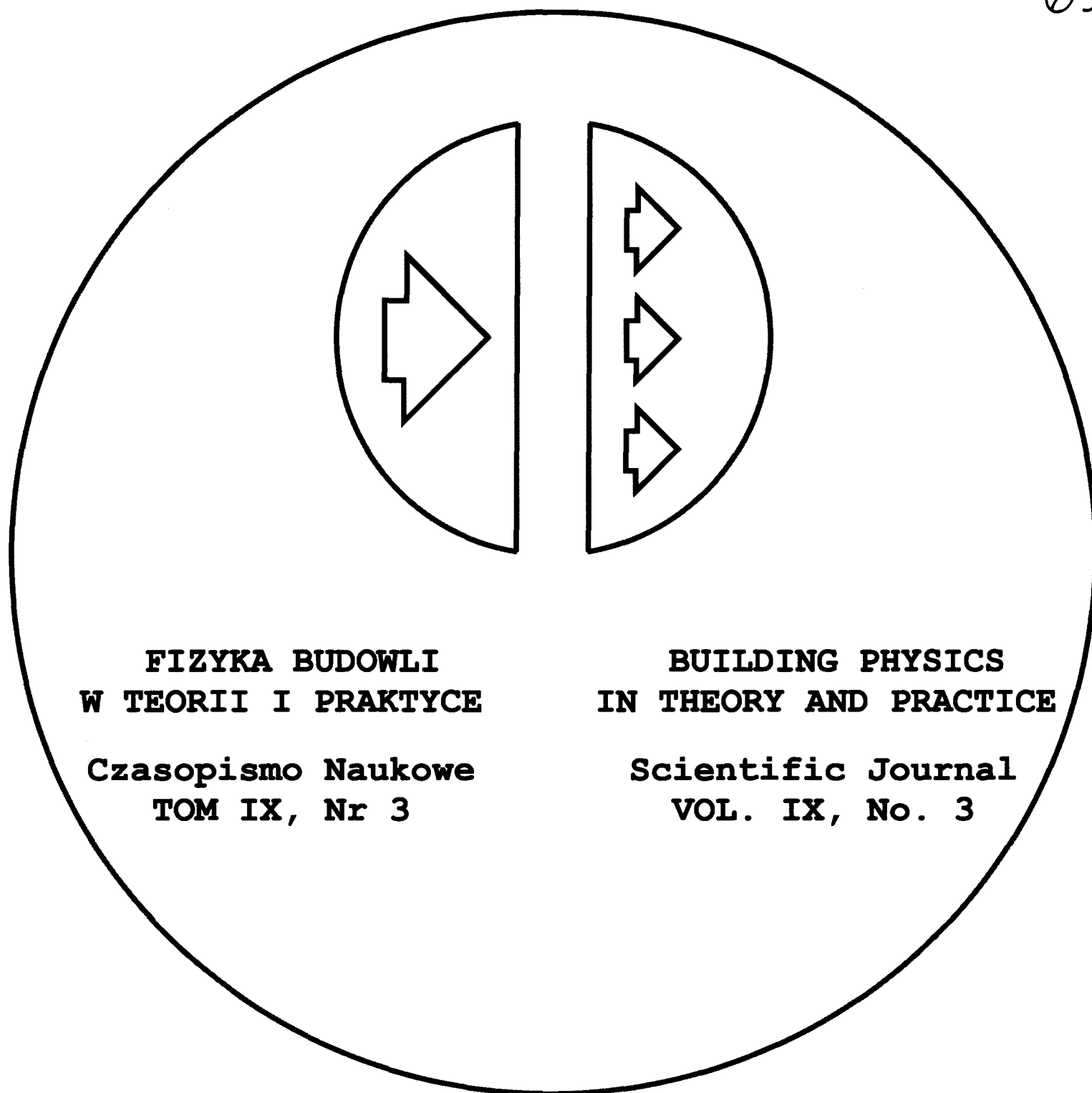
TOM IX, Nr 3

VOLUME IX, No. 3

ŁÓDŹ 2017

Biblioteka Główna
Politechniki Łódzkiej

p. *M-681*
68



**FIZYKA BUDOWLI
W TEORII I PRAKTYCE**

**Czasopismo Naukowe
TOM IX, Nr 3**

**BUILDING PHYSICS
IN THEORY AND PRACTICE**

**Scientific Journal
VOL. IX, No. 3**

INSTYTUT FIZYKI BUDOWLI KATARZYNA I PIOTR KLEMM S.C.

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

ŁÓDŹ 2017

RADA NAUKOWA – SCIENTIFIC COMMITTEE

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

ZESPÓŁ REDAKCYJNY – EDITORIAL BOARD

Redaktor Naczelny – Editor-in-chief
Prof. Piotr Klemm

Komitet Redakcyjny – Editorial Committee
Dr hab. Dariusz Heim
Dr hab. Katarzyna Klemm
Dr Maciej Wojtczak

WYDAWCA – PUBLISHER

Instytut Fizyki Budowli Katarzyna i Piotr Klemm S.C.
Institute of Building Physics Katarzyna & Piotr Klemm S.C.
ul. Świetlana 7, 91-490 Łódź, **e-mail: poczta@fizykabudowli.com.pl**
ISSN 1734-4891

Pamięci Profesora Jerzego Andrzeja Pogorzelskiego

Wspomnienie o Profesorze Jerzym Andrzeju Pogorzelskim

Jerzy A. Pogorzelski urodził się 17 października 1939 r. w Warszawie. Działalność zawodową rozpoczął w lipcu 1960 r. po ukończeniu Wydziału Budownictwa Lądowego PW. W październiku 1960 r. Jerzy A. Pogorzelski rozpoczął pracę w Instytucie Techniki Budowlanej jako pracownik inżynieryjno-techniczny. W ITB przeszedł wszystkie szczeble kariery zawodowej kolejno awansując na stanowiska: asystenta, starszego asystenta, adiunkta, docenta i profesora. Od 1962 r. do 1967 r. współpracował z Katedrą Budownictwa Ogólnego Politechniki Warszawskiej prowadząc wykłady z fizyki budowli. W okresie od października 1961 r. do czerwca 1966 r. Jerzy Andrzej Pogorzelski pracę w ITB łączył ze studiami na Wydziale Matematyczno-Fizycznym UW (kierunek: Fizyka). Zakończenie studiów pracą dyplomową na temat sprzężonego transportu ciepła i masy w ciałach kapilarno-porowatych wykonaną pod kierunkiem prof. Romana Żelaznego zbiegło się w czasie z obroną pracy doktorskiej na PW. W latach 1971 - 1974 Jerzy A. Pogorzelski pracował w Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie pełniąc funkcje Kierownika Katedry Budownictwa Rolniczego i Prodziekana Wydziału Budownictwa. W lipcu 1974 r. następuje powrót do Instytutu Techniki Budowlanej, gdzie pracując na stanowisku docenta, a od 1984 do 2006 r. profesora pełnił funkcję kierownika Zakładu badawczego (w latach 1991-94 Sekretarza Naukowego Instytutu). Od 1982 roku rozpoczęły się kontakty J. A. Pogorzelskiego z Politechniką Białostocką, w której na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska wykładał przedmioty związane z fizyką budowli, rozwojem zrównoważonym, diagnostyką cieplną budynków i termomodernizacją.



Podstawowa tematyka prac naukowych Profesora J. A. Pogorzelskiego to modelowanie matematyczne przenoszenia ciepła między budynkiem i jego otoczeniem, metody badań i badania właściwości cieplnych i wilgotnościowych materiałów i elementów budowlanych oraz racjonalne użytkowanie energii w budynkach. Jeszcze w okresie „przedkomputerowym”, połowa lat 60., opracowywał metody obliczeń cieplno-wilgotnościowych na użytek norm, wytycznych projektowania oraz materiałów szkoleniowych dla rzeczoznawców budowlanych.

Wyniki prac Profesora były wykorzystane przy opracowaniu polskiej normy PN-64/B-03404 „Współczynnik przenikania ciepła k dla przegród budowlanych”. Był on także współautorem polskiej normy PN-91/B-02020 „Ochrona cieplna budynków”, autorem PN-B-02025 „Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego” i współautorem dwóch programów komputerowych do obliczeń wg powyższej normy. Był autorem wymagań z zakresu ochrony cieplnej budynków w Rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki z września 1997 r. i współautorem założeń ustawy termomodernizacyjnej. Przejściowo, w latach 1974÷86 w wyniku jego zainteresowania tematyką bezpieczeństwa pożarowego i prowadzonych w tym zakresie prac badawczych wprowadzono do polskiej klasyfikacji pożarowej pojęcie stopnia rozprzestrzeniania ognia, co umożliwiło racjonalizację wymagań ochrony przeciwpożarowej w Rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki z sierpnia 1980 r. Był jednym z autorów pierwszych obliczeniowych metod oceny odporności ogniowej konstrukcji, za co otrzymał nagrodę PZITB im Żenczykowskiego w 1981 roku.

Intensywna praca w Polskim Komitecie Normalizacyjnym (w tym jako przewodniczący KT 179 PKN) dała efekty w postaci projektów dwóch norm na zasady stosowania płyt ze styropianu EPS (ustanowiona jako PN-B-20132) i ekstrudowanej pianki polistyrenowej XPS, jak również warunków technicznych wykonania i odbioru robót izolacji cieplnych, wydanych w 2006 roku. Profesor opracował dwa poradniki dla użytkowników norm cieplnych: projektantów, audytorów energetycznych i rzeczoznawców budowlanych.

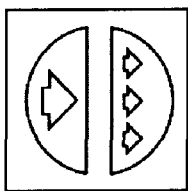
Profesor Jerzy Andrzej Pogorzelski był promotorem 10 zakończonych przewodów doktorskich w Instytucie Techniki Budowlanej, Politechnice Białostockiej i Politechnice Krakowskiej; opracował 10 recenzji rozpraw doktorskich; 2 recenzje prac habilitacyjnych; 1 wydawniczą recenzję habilitacyjną oraz 5 opinii dorobku na stanowisko docenta i profesora oraz do tytułu profesora.

Dr inż. Wiesław Sarosiek

SPIS TREŚCI

TABLE OF CONTENTS

BOCHENEK M., GARBALIŃSKA H., Badanie zmienności parametrów cieplnych betonu komórkowego w procesie jego wysychania z zawilgocenia powodziowego	9
KORUBA D., PIOTROWSKI J.Z., Analiza wpływu koncentracji ditlenku węgla, temperatury i wilgotności względnej powietrza na liczebność jednostek mogących tworzyć kolonie grzybów pleśniowych	13
LIS P., PIESYK J., Energy consumption and final energy demand for heating in educational buildings - identification of the problem	19
MARCHACZ M., ŻABA A., Wpływ pokryć ław kościelnych na charakterystyki pochłosowe wnętrza zabytkowego kościoła drewnianego	27
POĆWIERZ M. I., GUMOWSKI K., JÓŹWIAK K., PIECHNA J., Wpływ projektowanej zabudowy na warunki wiatrowe otoczenia na przykładzie inwestycji przy ul. Powązkowskiej w Warszawie	33
SOWA J., NOGA-ZYGMUNT J., UGOROWSKA J., Ocena parametrów powietrza wewnętrznego w budynku wyższej uczelni przed przewidywaną modernizacją do standardu niemal zero energetycznego	41
ŻELAZNY H., Natężenie oświetlenia ogólnego w narożach sali dydaktycznej przy różnych rodzajach fotoklimatu	47



BADANIE ZMIENNOŚCI PARAMETRÓW CIEPLNYCH BETONU KOMÓRKOWEGO W PROCESIE JEGO WYSYCHANIA Z ZAWILGOCENIA POWODZIOWEGO

Magdalena BOCHENEK*, Halina GARBALIŃSKA

*Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin
e-mail: Magdalena.Bochenek@zut.edu.pl, Halina.Garbalinska@zut.edu.pl*

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na próbkach z betonu komórkowego o gęstości 400 kg/m^3 . W pierwszej kolejności próbki poddano działaniu ciekłej wody, która wprowadzana była do ich wnętrza siłami podciągania kapilarnego. Następnie przystąpiono do pomiarów podstawowych parametrów cieplnych, prowadzonych na próbkach o różnym poziomie zawilgocenia. Wyznaczano współczynnik przewodzenia ciepła λ oraz objętościową pojemność cieplną c_p . Równocześnie część próbek poddano nasycaniu wodą, aż do momentu ustabilizowania się ich masy. Następnie próbki poddano suszeniu w warunkach laboratoryjnych, rejestrując tempo tego procesu przez okres pół roku. Głównym celem przeprowadzonego eksperymentu było wyznaczenie obydwu parametrów cieplnych dla próbek o różnym stanie zawilgocenia, a następnie odwzorowanie czasowych zmian zachodzących w parametrach cieplnych betonu komórkowego w trakcie jego wysychania z zawilgocenia powodziowego. Zmienne rozkłady wilgotności oraz przewodności i pojemności cieplnej po grubości przegrody odtworzono po upływie 1, 2, 3, 4 oraz 6 miesięcy trwania procesu wysychania.

Słowa kluczowe: beton komórkowy, przewodność cieplna, objętościowa pojemność cieplna, zawilgocenie, wysychanie

1. WPROWADZENIE

Świadomy dobór właściwych materiałów do wznoszenia szczególnie trudnych w eksploatacji przegród zewnętrznych wymaga pełnej znajomości ich właściwości fizycznych i mechanicznych. Właściwości te mogą ulegać silnym wahaniom w zależności od nasilenia działających na nie czynników, np. zawilgocenia. Materiały w stanie suchym wykazują zupełnie inne właściwości, niż w przypadku, gdy poddane zostaną działaniu wody.

Wiedza na temat zachowania się materiału budowlanego w różnych warunkach jest istotna, gdyż jest on narażony na

działanie wilgoci nie tylko w trakcie budowy, ale również w całym okresie użytkowania budynku. Według [1] projektowanie przegród budowlanych powinno uwzględniać wysychanie z zawilgocenia początkowego oraz wyeliminowanie możliwości trwałego ich zawilgocenia w warunkach eksploatacji.

Najważniejszymi jego źródłami są: wilgoć technologiczna, woda znajdująca się w gruncie, opady atmosferyczne, kondensacja powierzchniowa i wgłębna, jak również woda pochodząca z awarii instalacji wodociągowej oraz woda powodziowa [2, 3]. Ta ostatnia, najbardziej groźna, może dokonać olbrzymich zniszczeń. Badania stopnia zawilgocenia budynków bezpośrednio po powodzi wykazały, że wilgotność betonu komórkowego może osiągać poziom 50–60% [4]. Badaniami parametrów cieplnych betonu komórkowego w stanie zawilgocenia zajmowano się np. w pracach [5, 6, 7].

W niniejszym artykule opisano najpierw eksperymenty pozwalające oszacować wpływ zawilgocenia na podstawowe parametry cieplne (tj. przewodność cieplną i objętościową pojemność cieplną) betonu komórkowego o gęstości 400 kg/m^3 , a w dalszej kolejności eksperymenty pozwalające dokonać oceny zmienności przewodności cieplnej oraz pojemności cieplnej tego materiału w procesie jego wysychania z zawilgocenia powodziowego. Obszerny opis całości badań i uzyskanych w nich wyników podano w pracy [8]. Prezentowane w niniejszym artykule zestawienia są rozwinięciem wstępnych wyników zamieszczonych w [9]. Odnosiły się one wówczas jedynie do wybranych próbek (tu prezentowane są wyniki wypadkowe) i obejmowały jedynie pomiary zmienności współczynnika λ w okresie pierwszych trzech miesięcy wysychania.

*Autor korespondencyjny, e-mail: Magdalena.Bochenek@zut.edu.pl

2. BADANIE PARAMETRÓW CIEPLNYCH

Z bloczków betonu komórkowego wycięto po trzy próbki prostopadłościennie o wymiarach 12x12x24 cm. Po zinventaryzowaniu próbek przeprowadzono symulację sytuacji, w której przegroda wykonana z betonu komórkowego zostaje narażona na działanie ciekłej wody, wnikaącej w głąb danego materiału w wyniku działania sił kapilarnych. Do nasycania próbek zastosowano metodę grawimetryczną. Próbki prostopadłościennie zostały wprowadzone w kontakt z wodą za pośrednictwem jednej z powierzchni czołowych.

Po upływie miesięcznego okresu trwania procesu podciągania kapilarnego rozpoczęto badania, pozwalające ustalić zależność parametrów cieplnych od zawilgocenia. Prostopadłościanny pocięto po wysokości na 6 próbek o jednakowej grubości, wynoszącej około 4 cm. Na tak pociętych próbkach przeprowadzono metodą niestacjonarną badania parametrów cieplnych. Zastosowano aparat pomiarowy ISOMET 2104.

3. ZMIENNOŚĆ PARAMETRÓW CIEPLNYCH W PROCESIE WYSYCHANIA

W kolejnym eksperymencie niezaizolowane próbki o wymiarach 12x12x24 cm były wstępnie nasycane w procesie podciągania kapilarnego. Po upływie miesiąca próbki zanurzono całkowicie w wodzie i przechowywano w kąpieli aż do osiągnięcia stanu pełnego ich nasycenia. Następnie próbki te docięto na wymiar 10x10x24 cm i przecięto na dwie połowy (każda o wymiarze 10x10x12 cm).

Każdy bloczek zaizolowano na pięciu powierzchniach oraz dodatkowo owinięto folią – tak, aby proces wysychania odbywał się tylko przez jedną powierzchnię (10x10 cm).

Prowadzono systematyczne pomiary zmieniającej się masy wysychających próbek, a po upływie 30 dni wytypowano 4 próbki, które pocięto po długości na 10 plastrów, każdy o grubości h około 9÷10 mm.

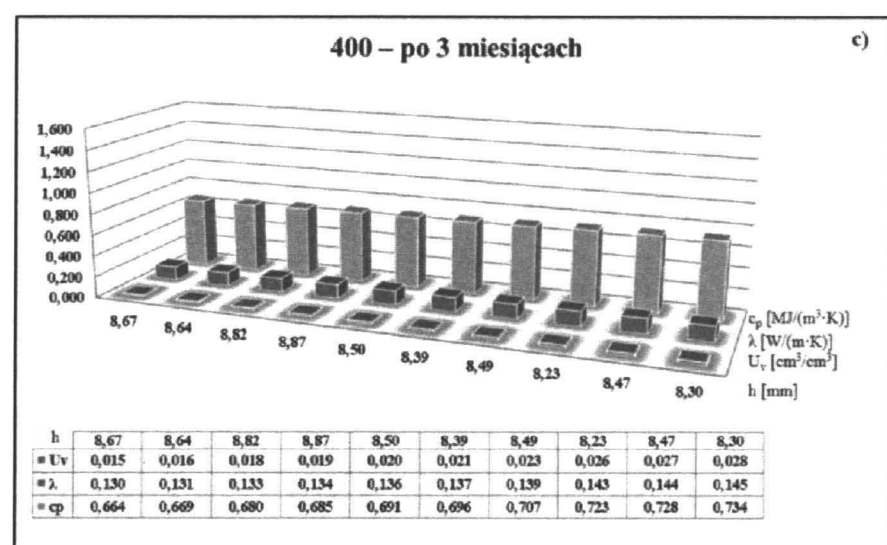
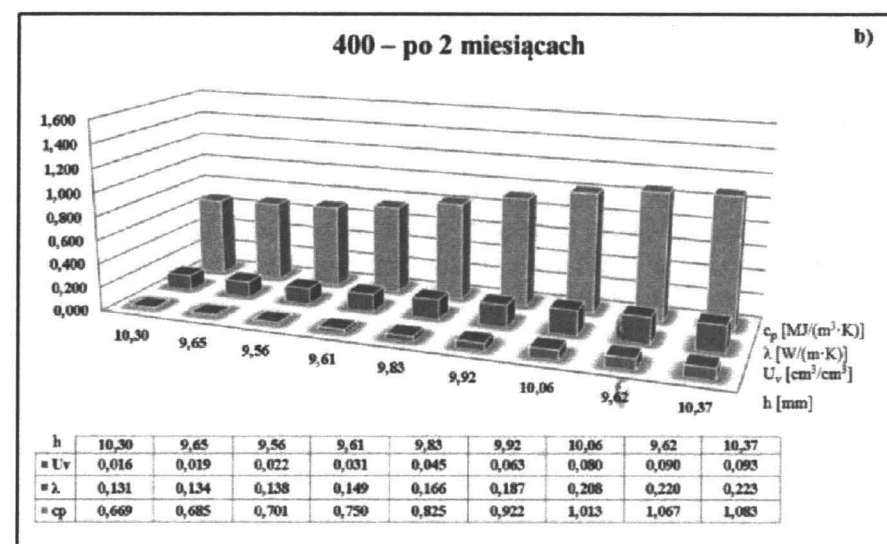
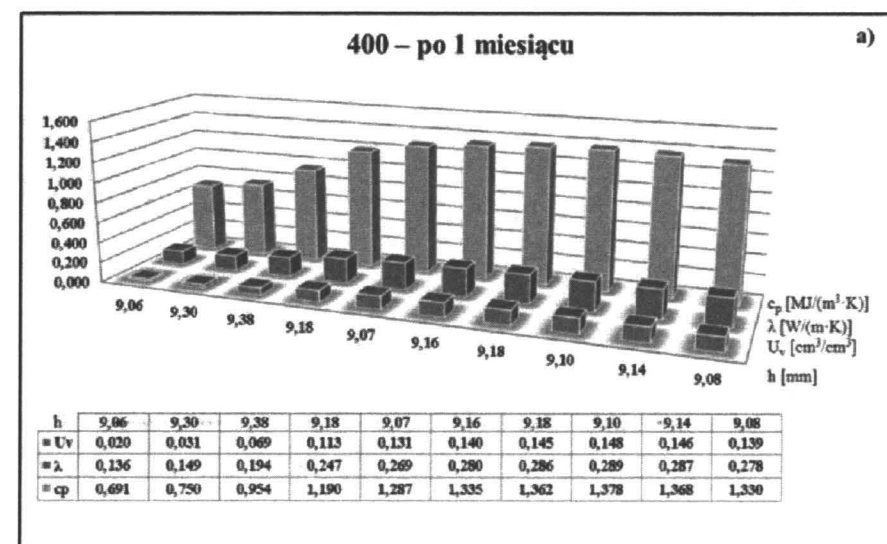
Po zinventaryzowaniu wszystkie plastry zostały umieszczone w suszarce w temperaturze 105°C i wysuszone do stałej masy. Umożliwiło to wyznaczenie wilgotności objętościowej każdego z plastrów.

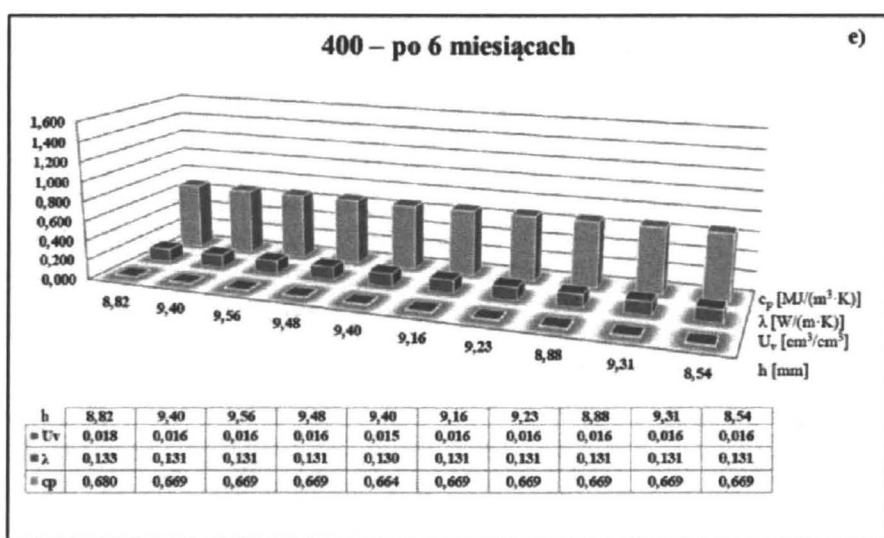
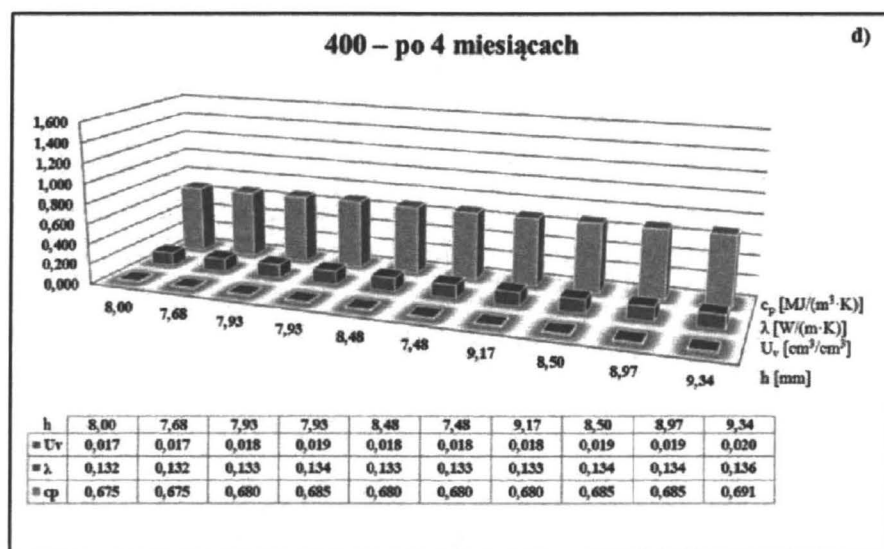
Po 60 dniach wytypowano kolejne 4 próbki prostopadłościennie i tak jak poprzednio pocięto je na 10 jednakowych plastrów, które następnie wysuszone do stałej masy. Po upływie 90 dni pocięto na plastry kolejne cztery bloczki. Po 120 dniach pocięto dwa bloczki na 10 jednakowych plastrów, a kolejne dwa bloczki pocięto po 180 dniach.

Analizie poddano przebieg zmian zawilgocenia w obrębie wysychającego elementu i zmian parametrów cieplnych w procesie jednokierunkowego wysychania badanego betonu komórkowego.

Na rysunku 1 zawarto zestawienia średnich wartości objętościowej zawartości wilgoci U_v , przewodności cieplnej λ oraz

objętościowej pojemności cieplnej c_p w trakcie wysychania betonu komórkowego klasy 400 kg/m³ – w odniesieniu do dziesięciu składowych plastrów o uśrednionych grubościach h . Kolejne zestawienia a) ÷ e) dotyczą poszczególnych okresów badawczych, obejmując łącznie okres ½ roku.





Rys. 1. Średnie wartości zawartości wilgoci U_v , przewodności cieplnej λ , objętościowej pojemności cieplnej c_p betonu komórkowego klasy 400 kg/m³ w trakcie wysychania trwającego: a) 1 miesiąc, b) 2 miesiące, c) 3 miesiące, d) 4 miesiące, e) 6 miesięcy.

Fig. 1. The mean moisture content of U_v , thermal conductivity λ , and heat capacity c_p of aerated concrete of density class 400 kg/m³ during the following drying periods: a) 1 month, b) 2 months c) 3 months, d) 4 months, e) 6 months

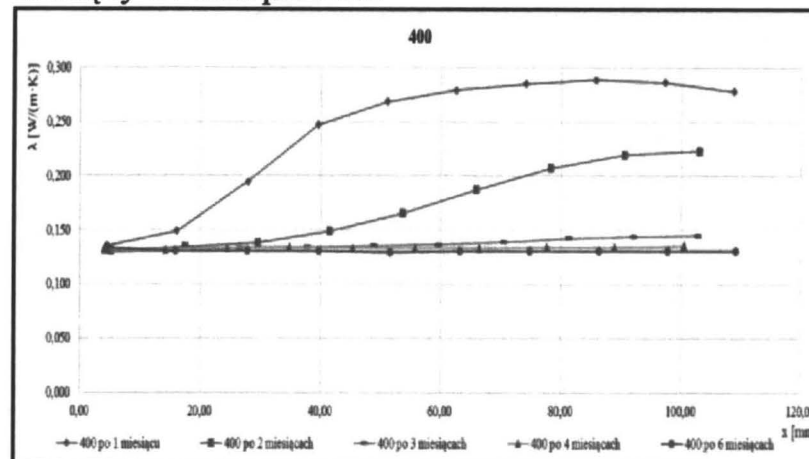
Dane zestawione na rysunkach 1a) ÷ 1e) każdorazowo odnoszą się (patrząc od lewej do prawej) do kolejnych dziesięciu plastrów pobieranych ze stref coraz bardziej oddalonych od wysychającej powierzchni elementu.

4. ANALIZY I WNIOSKI

Przeprowadzony eksperyment pozwolił ocenić skalę zmian parametrów cieplnych, wywołanych po pierwsze działaniem ciekłej wody rozprzestrzeniającej się w obrębie przegrody, a po drugie występujących w trakcie procesu wysychania.

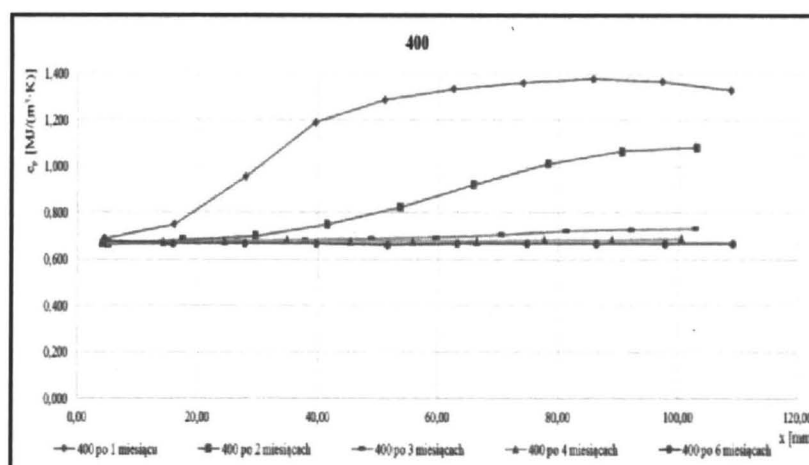
Aby lepiej odwzorować dane zebrane w trakcie 1/2 rocznego eksperymentu opracowano poniższe zestawienia zbiorcze, przy czym rys. 2 odnosi się do zmian przewodności cieplnej λ , a rys. 3 objętościowej pojemności cieplnej c_p . W każdym przypadku podano rozkłady zmienności danego parametru po

grubości wysychającej przegrody po upływie 1, 2, 3, 4 oraz 6 miesięcy trwania procesu.



Rys. 2. Średnie wartości przewodności cieplnej λ w procesie wysychania

Fig. 2. The mean thermal conductivity λ during drying process



Rys. 3. Średnie wartości objętościowej pojemności cieplnej c_p w procesie wysychania

Fig. 3. The mean heat capacity c_p during drying process

Bazując na uśrednionych danych można stwierdzić, że po 1 miesiącu wartości przewodności cieplnej λ oraz objętościowej pojemności cieplnej c_p , przypisane do skrajnych stref wysychającego elementu różnią się dwukrotnie. Po dwóch miesiącach różnice między wartościami badanych parametrów cieplnych we wnętrzu wysychającego elementu i w jego strefie brzegowej sięgają 70% w przypadku współczynnika λ oraz 60% w przypadku parametru c_p . Po upływie 3 miesięcy maksymalna skala zróżnicowania obydwu parametrów to około 10%. Kolejne przebiegi dotyczące 4 oraz 6 miesięcy dowodzą, że różnice w parametrach cieplnych oscylują na poziomie błędów pomiarowych.

Zatem w odniesieniu do betonu klasy 400 można stwierdzić, że zrealizowane badania dowiodły występowania silnego zróżnicowania w rozkładzie badanych wielkości fizycznych (λ , c_p oraz U_v) zarówno po 1-miesięcznym, jak i 2-miesięcznym okresie wysychania. Po trwającym 3 miesiące procesie następuje powolny powrót do stanu zbliżonego do wyjściowego pod względem wilgotnościowym oraz cieplnym. Całkowita stabilizacja wilgoci, jak również wartości

parametrów λ oraz c_p , nastąpiła w przypadku betonu klasy 400 po 4-miesięcznym okresie wysychania.

Powyższe relacje przekładają się w specyficzny sposób na walory energetyczne przegrody, w różnym stopniu zawilgoconej.

Proste obliczenia pozwalają stwierdzić, że sucha ściana wykonana z badanego betonu komórkowego 400 kg/m³ o współczynniku $\lambda = 0,11$ [W/(m·K)], spełni aktualne wymagania [10] dotyczące granicznej wartości współczynnika przenikania ciepła $U = 0,23$ [W/(m²·K)] – przy grubości wynoszącej 46 cm. Ta sama przegroda w stanie nasycenia wodą, tj. przy współczynniku λ rzędu 0,30 [W/(m·K)], będzie cechowała się współczynnikiem $U = 0,59$ [W/(m²·K)], czyli wykaże ponad 2,5-krotne przekroczenie dopuszczalnej wartości U_{max} .

Aby przegroda z betonu komórkowego klasy 400 kg/m³, będącego w stanie powietrzno-suchym, spełniła wymagania WT [10] musiałaby mieć grubość minimum 54 cm – przy średnim $\lambda \approx 0,13$ [W/(m·K)].

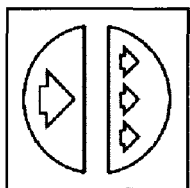
RESEARCH ON THERMAL PARAMETERS VARIABILITY OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE DURING THE PROCESS OF POST FLOOD DRYING

Summary: This paper presents the results of experimental studies which were conducted on the samples of aerated concrete of density class 400 kg/m³. First, the samples were exposed to a strong effect of liquid water which was introduced into their interior by capillary forces. Next, basic thermal parameters were measured and some tests were carried out on samples of various degree of moisture. The coefficient of thermal conductivity λ and the heat capacity c_p were determined. At the same time, a part of the samples was saturated with water until they stabilized. Next, the samples were dried under laboratory conditions, recording the rate of this process for a period of half a year. The main goal of the experiment was to determine both thermal parameters for the samples of various degree of moisture and then to map the temporal changes in the thermal parameters of the aerated concrete during the drying out of post flood moisture. The variables of moisture distribution, thermal conductivity and heat capacity across the width of wall were reconstructed after 1, 2, 3, 4 and finally 6 months of drying process.

Literatura

- [1] Grabarczyk S. *Fizyka budowli. Komputerowe wspomaganie projektowania budownictwa energooszczędnego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
- [2] Pogorzelski J.A., Bobociński A. *Problemy z oceną stanu wilgotnościowego przegród budowlanych*. Konferencja Naukowo-Techniczna: Energooszczędne Budownictwo Mieszkaniowe, Mrągowo, 2001, s. 79-87
- [3] Trochonowicz M. *Wilgoć w obiektach budowlanych. Problematyka badań wilgotnościowych*. Budownictwo i Architektura, 7, 2010, s. 131-144

- [4] Adamowski J. *Problemy zawilgoceń oraz osuszania budynków po powodzi*. Przegląd Komunalny, 7, 226, 2010, s. 1-9
- [5] Drochytka R., Zach J., Hroudova J.: *Non-destructive testing of influence of moisture on properties of autoclaved aerated concrete*. E-Journal of Nondestructive Testing, 2011
- [6] Gawin D., Kośny J., Desjarlais A.: *Effect of moisture on thermal performance and energy efficiency of buildings with lightweight concrete walls*. Proceedings ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 3, 2000, s. 3149-3160
- [7] Jerman M., Keppert M., Výborný J., Černý R.: *Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete*. Construction and Building Materials, 41, 2013, s. 352-359
- [8] Bochenek M. *Ocena zmienności parametrów higrotermicznych betonu komórkowego o zróżnicowanej gęstości*. Praca doktorska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2016
- [9] Garbalińska H., Bochenek M. *Popowodziowe wysychanie przegród wykonanych z betonu komórkowego i zachodzące zmiany przewodności cieplnej*. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury JCEEA, t. XXXI, z. 61 (3/II/14), lipiec-wrzesień 2014, s. 155-162
- [10] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12.04.2004 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. Nr 75, poz. 690 (z późniejszymi zmianami)



ANALIZA WPŁYWU KONCENTRACJI DITLENKU WĘGLA, TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI WZGLĘDNEJ POWIETRZA NA LICZEBNOŚĆ JEDNOSTEK MOGĄCYCH TWORZYĆ KOLONIE GRZYBÓW PLEŚNIOWYCH

Dorota KORUBA*, Jerzy Zbigniew PIOTROWSKI

*Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Katedra Fizyki Budowli i Energii Odnawialnej
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, email: dkoruba@tu.kielce.pl, piotrowski@tu.kielce.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę matematyczną wyników badań ilościowych grzybów pleśniowych i parametrów mikroklimatu w budynkach mieszkalnych z indywidualnym systemem nawiewnym. Przy zastosowaniu metody planowania eksperymentu otrzymano model matematyczny, który daje możliwość obliczenia ilości grzybów pleśniowych w m³ powietrza przy różnych stężeniach CO₂.

Słowa kluczowe: mikroklimat pomieszczeń zamkniętych, grzyby pleśniowe, modelowanie, planowanie eksperymentu.

1. WPROWADZENIE

Problem jakości powietrza wewnętrznego w budynkach nabrał dużego znaczenia wraz ze wzrostem świadomości użytkowników obiektów oraz ze zmianami w technologii budowlanej. Jak powszechnie wiadomo w pomieszczeniach zamkniętych ludzie spędzają ok 80÷90% swojego czasu. Fakt ten był przyczyną, iż przeniesiono ciężar zainteresowań na jakość powietrza wewnętrznego.

Zanieczyszczenia powietrza wewnętrznego obejmują czynniki fizyczne, chemiczne i biologiczne, w tym również odbiegające od norm parametry mikroklimatu. W pracy podjęto próbę znalezienia istotnej zależności pomiędzy jednostkami mogącymi tworzyć kolonie grzybów pleśniowych a parametrami mikroklimatu.

Grzyby pleśniowe są mikroorganizmami eukariotycznymi, chemoorganoheterotrofami o małych wymaganiach pokarmowych. Grzyby pleśniowe mają bardzo dużą zdolność przystosowywania się do środowiska, co powoduje, że posiadają charakter kosmopolityczny. Optymalna temperatura wzrostu grzybów pleśniowych mieści się w granicach 20÷35°C, lecz wiadomym jest również, że mogą rozwijać się w temperaturach z zakresu:

od -32°C do 130÷150°C. Wilgotne środowisko ułatwia wzrost grzybów pleśniowych, jednakże są gatunki żyjące w bardzo suchych środowiskach. W zależności od gatunku optymalne pH dla grzybów pleśniowych wynosi 5÷6, ale rozwijają się również w środowiskach o pH od 1÷10. Optymalna wilgotność podłoża, na którym mogą aktywnie rozwijać się grzyby pleśniowe, wyrażona aktywnością wody (a_w) i jest uzależniona od gatunku mikroorganizmów. Aktywność wody, przy której szybkość wzrostu mikroorganizmów jest najwyższa nazywamy optymalną wilgotnością podłoża. Spadek a_w poniżej wartości optymalnej powoduje spowolnienie wzrostu i wydłużenie fazy adaptacyjnej. Aktywność wody a_w , poniżej której zostaje zahamowany wzrost drobnoustrojów, nazywamy minimalną wilgotnością podłoża. Wyodrębniono trzy kategorie grzybów pleśniowych w zależności od poziomu wilgotności wymaganej do wzrostu wybranych mikroorganizmów na materiałach budowlanych, wykończeniowych i wyposażenia wewnątrz:

- trzeciorzędowi kolonizatorzy (hydrofile): $a_w > 0,90$ (m.in. *Alternaria alternata*, *Aspergillus fumigatus*, *Fusarium moniliforme*, *Mucor plumbeus*, *Phialophora* spp., *Rhizopus* spp., *Trichoderma* spp.)
- drugorzędowi kolonizatorzy: a_w 0,80-0,90 (m.in. *Aspergillus flavus*, *Aspergillus versicolor*, *Cladosporium cladosporioides*, *Cladosporium herbarum*)
- pierwszorzędowi kolonizatorzy (kserofilne): $a_w < 0,80$ (m.in. *Alternaria citri*, *Aspergillus* spp., *Aspergillus glaucus*, *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium expansum*)

*Autor korespondencyjny, e-mail: dkoruba@tu.kielce.pl

Minimalna wartość tego parametru dla wielu gatunków grzybów pleśniowych mieści się w granicach 0,7÷0,6 – kserofile.

Wilgotność względna powietrza (WWP) na poziomie 70%, nie wpływa bezpośrednio na rozwój grzybów pleśniowych, ale sprzyja wtórnemu zawilgoceniu materiałów budowlanych, co z kolei umożliwia wzrost grzybów pleśniowych w postaci grzybni na zawilgoconym podłożu [3].

Praktyka wskazuje, że do objawów pleśnienia może dojść także przy dużo niższej wilgotności powietrza, jeśli nie jest spełniony warunek prawidłowo funkcjonującej wentylacji w pomieszczeniach.

Istnieje niewiele aktualnych doniesień dotyczących wpływu stężenia ditlenku węgla zawartego w powietrzu wewnętrznym na wzrost grzybów pleśniowych występujących w pomieszczeniach zamkniętych. Można znaleźć prace badawcze z początku XX w. [7, 13], w których podejmowana była problematyka wpływu ditlenku węgla na rozwój grzybów pleśniowych. Prace te prowadzili i prowadzą naukowcy w obszarze przemysłu spożywczego, a dokładnie przetwórstwa owocowo-warzywnego, w którym to ditlenek węgla służył jako środek zapobiegający pleśnieniu produktów, jednak ostateczne doniesienia wskazują na możliwy wzrost grzybów pleśniowych na owocach w atmosferze do 9000 ppm [2, 4]. Można zatem potwierdzić przypuszczenie, że ditlenek węgla przyczynia się do aktywnego wzrostu grzybów pleśniowych.

2. MATERIAŁY I METODY

2.1. Materiały

Obiekty badawcze: pomieszczenia zamknięte – mieszkalne, w kamienicy w której zainstalowano indywidualny system nawiewny (patent PL 180999) [11], w których prowadzono badania podstawowych parametrów mikroklimatu tj. temperatury (t_1) [°C], wilgotności względnej powietrza (WWP) (φ) [%], stężenia ditlenku węgla (CO₂) [ppm] oraz ilości jednostek mogących tworzyć kolonie grzybów pleśniowych [jtk/m³].

2.2. Metody badawcze

Badania podstawowych parametrów mikroklimatu wewnętrznego pomieszczeń mieszkalnych prowadzono przez okres jednego roku, z podziałem na okresy wiosenno-letni, jesienno-zimowy. W każdym okresie badawczym wykonano badania czterokrotnie przez okres 1 tygodnia, przy użyciu mierników jakości powietrza wewnętrznego Indoor Air Quality Monitor PS32. Równolegle prowadzono badania ilości jednostek mogących tworzyć kolonie [jtk/m³]

grzybów pleśniowych. Metodykę opracowano na podstawie norm [12], dostępnej literatury [10] oraz własnych doświadczeń badawczych. Jednostki mogące tworzyć kolonie grzybów pleśniowych pobierano z powietrza pomieszczeń mieszkalnych metodą sedymentacyjną Kocha, zastosowano 30-minutowy czas ekspozycji płytek Petriego z podłożem selektywnie – wybiórczym (w trzech powtórzeniach). Próby inkubowano w cieplarkach mikrobiologicznych w temperaturze 26°C, przez 7 dni, na podłożu Sabourauda z chloramfenikolem.

Zastosowano analizę matematyczną badanych parametrów w celu określenia wpływu stężenia ditlenku węgla w powietrzu, temperatury i wilgotności względnej powietrza na proces wzrostu jednostek mogących tworzyć kolonie grzybów pleśniowych. Badany proces przedstawiono w postaci tzw. czarnej skrzynki, która charakteryzuje nieznaną mechanizm działania badanego zjawiska [1, 5, 6, 8, 9].

Zaplanowany eksperyment miał charakter pasywny, co oznacza, że analizie poddajemy zjawisko w naturalnych warunkach nie wprowadzając zmian wartości parametrów badanych (wejściowych), przy założeniu, że wielkości wejściowe z zasady ulegają zmianom na dwóch poziomach: górnym i dolnym [9].

Za pomocą czarnej skrzynki, jak również planowania eksperymentu uzyskano informację i określono stopień wpływu wielkości wejściowych na badany proces.

3. WYNIKI BADAŃ – ANALIZA MATEMATYCZNA

Wyznaczono wielkości wejściowe, które wchodziły do czarnej skrzynki ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), gdzie:

x_1 - temperatura (t_1)

x_2 - wilgotność względna powietrza (φ)

x_3 - stężenie ditlenku węgla (CO₂)

oraz wielkości wyjściowe (y),

gdzie:

y – tzw. funkcja odpowiedzi – ilość jednostek mogących tworzyć kolonie grzybów pleśniowych w 1 m³ powietrza.

Następnie ustalono zależność:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

Powyższą funkcję można przedstawić w postaci wielomianu:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (2)$$

gdzie:

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – współczynniki regresji, które można wyznaczyć za pomocą zaplanowanego eksperymentu.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki uśrednionych pomiarów 8 badań z trzech powtórzeń dla kompletnego dwupoziomowego eksperymentu.

Tabela 1. Wyniki pomiarów
Table 1. Measurement results

Nr badania	Czynniki			Funkcja odpowiedzi (y)
	$t_1, [^{\circ}\text{C}]$ x_1	$\varphi, [\%]$ x_2	$\text{CO}_2, [\text{ppm}]$ x_3	
1	2	3	4	5
1	25,35	52,46	1537,53	44
2	24,74	50,75	1123,25	61
3	27,24	45,89	1174,43	79
4	26,40	46,22	1237,45	61
5	25,63	42,15	618,76	297
6	23,78	37,5	630,94	297
7	26,52	31,53	597,35	367
8	25,47	33,73	622,35	402

Na podstawie danych zawartych w tabeli 1 obliczono średnią arytmetyczną wielkości wyjściowych tj. poszczególnych mierzonych parametrów mikroklimatu wewnętrznego, dla dwóch poziomów górnego (+) i dolnego (-), dla temperatury powietrza wewnętrznego:

$$t^+ = 26,44^{\circ}\text{C}$$

$$t^- = 24,84^{\circ}\text{C}$$

zakres zmian pierwszego czynnika wynosi:

$$\Delta t = 1,6^{\circ}\text{C},$$

interwał zmian wynosi:

$$\delta_1 = 0,8.$$

dla wilgotności względnej powietrza:

$$\varphi^+ = 48,83\%$$

$$\varphi^- = 36,22\%$$

zakres zmian pierwszego czynnika wynosi:

$$\Delta \varphi = 12,61\%$$

interwał zmian wynosi:

$$\delta_1 = 6,305\%$$

dla stężenia ditlenku węgla:

$$\text{CO}_2^+ = 1268,17 \text{ ppm}$$

$$\text{CO}_2^- = 617,35 \text{ ppm}$$

zakres zmian pierwszego czynnika wynosi:

$$\Delta \text{CO}_2 = 650,82 \text{ ppm},$$

interwał zmian wynosi:

$$\delta_3 = 325,41 \text{ ppm}.$$

Wartości liczbowe wielkości wyjściowych różnią się od wartości liczbowych uzyskanych w trakcie badań, różnica ta wynika z charakteru eksperymentu – (pasywny), co powoduje niemożliwość utrzymywania parametrów na wyznaczonym poziomie. W związku z tym metoda planowania eksperymentu umożliwia wyznaczenia wpływu wielkości wejściowych na funkcję odpowiedzi w pierwszym przybliżeniu.

W kolejnym etapie modelowania obliczono współczynniki regresji b_o, b_i, b_{ij} dla wielomianu (2).

Za pomocą formuł (3), (4):

$$b_o = \frac{\sum_{i=1}^b y_i}{N} \quad (3)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^b x_{1i} y_i}{N}, \quad (4)$$

obliczono współczynniki b_o, b_1

$$b_o = \frac{\sum_{i=1}^b y_i}{8} = \frac{44 + 61 + 79 + 61 + 297 + 297 + 367 + 402}{8} = 201 \quad (5)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^b x_{1i} y_i}{N} = \frac{44 - 61 + 79 - 61 + 297 - 297 + 367 - 402}{8} = -4,25 \quad (6)$$

Analogicznie obliczono pozostałe współczynniki.

Po obliczeniach otrzymujemy:

$$b_2 = -26,25; \quad b_3 = -139,75; \quad b_{12} = 0; \quad b_{13} = 4,5; \quad b_{23} = 17,5; \quad b_{123} = -8,75.$$

W tym przypadku liniowy model matematyczny ma postać:

$$y = b_o + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_{12} + b_{13} x_{13} + b_{23} x_{23} + b_{123} x_{123} \quad (7)$$

Podstawiając wyznaczone współczynniki regresji, otrzymujemy:

$$y = 201 - 4,25 x_1 - 26,25 x_2 - 139,75 x_3 + 4,5 x_{13} + 17,5 x_{23} - 8,75 x_{123} \quad (8)$$

gdzie:

x_1, x_2, x_3 – zakodowane wielkości wejściowe, które wyznaczono przy użyciu następującej formuły (9):

$$x_i = \frac{X_i - X_{io}}{\delta_1} \quad (9)$$

gdzie:

x_i – naturalne wartości wielkości wejściowej

X_{io} – naturalne wartości wielkości wejściowej na poziomie zerowym

δ_1 – interwał zmian odpowiedniej wielkości wejściowej

W równaniu (8) x_{13} jest sumą pierwszego i trzeciego czynnika w zakodowanej postaci.

Przykładowo dla pierwszej wielkości wejściowej, tj. temperatury powietrza wewnętrznego, wartość x_1 w zakodowanej postaci wynosi 0,2, gdy temperatura powietrza wynosi $t = 25,8^\circ\text{C}$, po obliczeniu δ_1 oraz X_{10} .

Analogicznie można przekształcić naturalną wielkość czynnika wejściowego w kodowaną postać i zastosować równanie (8) do obliczenia funkcji odpowiedzi y tzn. do obliczenia ilości jednostek mogących tworzyć kolonie (jtk) grzybów pleśniowych w 1m³ badanego powietrza.

Na podstawie analizy otrzymanego równania (8), oraz analizy współczynników b_1, b_2, b_3 można dojść do wniosku, że najbardziej istotny wpływ na wzrost grzybów pleśniowych ma wielkość wejściowa (x_3) – stężenie ditlenku węgla w powietrzu. Drugą z kolei wielkością wejściową mającą wpływ na wzrost grzybów pleśniowych jest wilgotność względna powietrza (x_2), a na końcu dopiero temperatura (x_1).

Jednak wniosek z tych analiz ma wartość przybliżoną i może scharakteryzować jedynie wpływ zmiennych wielkości (eksperyment pasywny) wejściowych na wielkość wyjściową. Nadmienić należy, iż zakresy zmian mogą także wpływać istotnie na ocenę wielkości wejściowych. W przypadku przeprowadzanego eksperymentu zakres zmian odpowiadał zmiennym parametrom powietrza w warunkach rzeczywistych.

4. OCENA MODELU

4.1. Ocena istotności współczynników regresji

Dokonano oceny współczynników równania regresji (8), na podstawie porównania wartości bezwzględnej współczynnika z przedziałem ufności.

$$|b_i| \geq \Delta b \quad (10)$$

gdzie:

Δb – to przedział ufności

Jeżeli wartość bezwzględna współczynnika b_i jest mniejsza niż przedział ufności, to można przyjąć, że wynosi on zero i nie należy włączać go w równanie regresji (8).

Przedział ufności wyznaczono za pomocą t -kryterium studenta

$$\Delta b = t_{(0,05;f_y)} \sqrt{\frac{S_y^2}{N \cdot M}} \quad (11)$$

gdzie:

$t_{(0,05;f_y)}$ – 5% rozmieszczenia t z f_y stopniem swobody

S_y^2 – wariancja

N – ilość badań na różnych poziomach

M – ilość paralelnych badań na jednym poziomie

Wariancję w każdym badaniu obliczono przy użyciu równania

$$S_y^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (y_{uj} - \bar{y}_u)^2 \quad (12)$$

gdzie:

y_{uj} – wartość funkcji odpowiedzi przy pierwszych pomiarach

$\bar{y}_u$ – średnia wartość funkcji

Tabela 2 przedstawia wartości wariancji z badań.

Tabela 2. Wyniki pomiarów jtk/m³ grzybów pleśniowych i wariancji

Table 2. The measurement results cfu / m³ fungi and variance

Nr badania	Ilość grzybów na m ³				Odchylenia od średniej wartości			Wariancja S_y^2
	1 pomiar y_{u1}	2 pomiar y_{u2}	3 pomiar y_{u3}	średnia wartość $\bar{y}_u$	$ y_{u1} - \bar{y}_u $	$ y_{u2} - \bar{y}_u $	$ y_{u3} - \bar{y}_u $	
1	26	79	26	44	18	35	18	936,5
2	79	53	53	61	18	8	8	226
3	79	105	53	79	0	26	26	679
4	79	53	53	61	18	8	8	226
5	158	316	421	297	139	19	124	17529
6	263	421	211	297	34	124	86	11964
7	158	342	606	367	209	25	239	50714
8	421	421	369	402	19	19	33	905,5
$\Sigma 83177$								

Średnia wartość wariancji dla ośmiu badań wynosi:

$$S_y^2 = 10397$$

Przedział ufności dla ośmiu badań wynosi:

$$\Delta b = 48,1$$

Porównując wartości współczynników z przedziałem ufności do równania regresji można włączyć jedynie współczynniki b_0 i b_3 . Wszystkie inne współczynniki nie są istotne, co umożliwia uproszczenie równania regresji (8), co równocześnie uprawnia nas do stwierdzenia, że ditlenek węgla istotnie wpływa na liczebność jednostek mogących tworzyć grzyby pleśniowe.

Matematyczny model w uproszczeniu ma postać:

$$y = 201 - 139,75x_3 \quad (13)$$

4.2. Ocena adekwatności modelu matematycznego

Oceny adekwatności modelu matematycznego dokonano za pomocą kryterium Fishera, które można wyliczyć zgodnie ze wzorem:

$$F = \frac{M \cdot \sum_{i=1}^8 (\bar{y}_i - y_{ip})^2}{f_{ag} \cdot S_y^2} \quad (14)$$

gdzie:

$\bar{y}_i$ - średnia wartość funkcji odpowiedzi, wyliczona na podstawie badań eksperymentalnych

y_{ip} - wynikowa wartość funkcji odpowiedzi dla pierwszego badania

f_{ag} - ilość stopni swobody wariancji adekwatności, gdzie:

$$f_{ag} = N - k - 1 \quad (15)$$

N - ilość badań

k - ilość wielkości wejściowych

S_y^2 - średnia wartość wariancji w naszym przypadku:

$$S_y^2 = 10397$$

$$f_{ag} = 4$$

W tabeli 3 przedstawiono eksperymentalne i obliczeniowe wartości funkcji odpowiedzi, wartości obliczeniowe wyliczono za pomocą modelu (13).

Tabela 3. Eksperymentalne i obliczeniowe wartości funkcji odpowiedzi

Table 3. Experimental and calculation values of the response function

Nr badania	Eksperymentalna wartość $\bar{y}_i$	Obliczeniowa wartość y_{ip}	Odchylenie $(\bar{y}_i - y_{ip})^2$
1	2	3	4
1	44	61,25	297,56
2	61	61,25	0,06
3	79	61,25	315,06
4	61	61,25	0,06
5	297	340,75	1914,06
6	297	340,75	1914,06
7	367	340,75	689,06
8	402	340,75	3751,56
$\Sigma 8881,5$			

Model uważa się za adekwatny w przypadku, gdy spełniona jest nierówność:

$$F < F_{tabela} \quad (16)$$

W naszym przypadku $F = 0,642$, a tabelaryczne $F = 3,00$

Nierówność jest spełniona i można postawić wniosek, że model adekwatnie opisuje badany proces rozwoju grzybów pleśniowych w określonych warunkach mikroklimatycznych panujących w badanym obiekcie.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podsumowując wyniki analizy wpływu parametrów mikroklimatu na proces rozwoju grzybów pleśniowych stwierdzono, iż istotny wpływ ma głównie stężenie ditlenku

węgla w powietrzu, następnie wilgotność względna powietrza, a na końcu dopiero temperatura powietrza.

Przy zastosowaniu metody planowania eksperymentu otrzymano model matematyczny (13), który daje możliwość obliczenia ilości grzybów pleśniowych w m³ powietrza przy różnych stężeniach CO₂.

Model daje wiarygodne wyniki w zakresie zmian parametrów, przy których prowadzono eksperyment.

Wnioski:

1. Poziom stężenia CO₂ może być parametrem wskazującym na możliwość wystąpienia grzybów pleśniowych w pomieszczeniach zamkniętych.
2. Wysokie stężenie ditlenku węgla korzystnie wpływa na liczebność jednostek mogących tworzyć kolonie grzybów pleśniowych.
3. Konieczne jest dalsze prowadzenie badań laboratoryjnych i obserwacji rzeczywistych w celu potwierdzenia powyższych tez.

THE CARBON DIOXIDE CONCENTRATION, TEMPERATURE AND HUMIDITY IMPACT ANALYSIS ON THE QUANTITY OF UNITS WHICH CAN CREATE FUNGUS

Summary: The paper presents a mathematical analysis of the quantitative research results of mold fungus and microclimate parameters in the residential buildings with individual supply system. Using the experimental planning method a mathematical model was obtained, which allowed to calculate the number of molds fungus in m³ of air at different CO₂ concentrations.

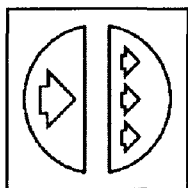
Key words: microclimate of enclosed spaces, fungus, modeling, experiment planning

Literatura

- [1] Abbass H.A., Sarker R.A., Newton Ch. S. *Data Mining: A Heuristic Approach* Idea Group Publishing (2002)
- [2] Belbahi A., Leguerinel I., Méot J.M., Loiseau G., Madani K., Bohuon P. *Modelling the effect of temperature, water activity and carbon dioxide on the growth of Aspergillus niger and Alternaria alternata isolated from fresh date fruit*. Journal of Applied Microbiology Vol. 121, Is. 6, (2016) 1685–1698.
- [3] Carlile M.J., Watkinson S.C., Gooday G.W. *The Fungi* (Second Edition), London, Academic Press Elsevier, (2001); 588.

- [4] Carrillo-Inungaray M.L., Hidalgo-Morale M., Rodriguez-Jimenes G. del C., Garcia-Alvarado M.A., Ramirez-Lepe M., Munguia A.R., Robles-Olvera V. *Effect of temperature, pH and water activity on Penicillium digitatum growth*. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2, (2014), 930-937
- [5] Hebbar A., Mechmache M., Ouinas D., Berras A., *Application of the Experimental Designs on the modelling of the combustion's parameters*. Journal of Applied Sciences 6(12), (2006) 2599-2604,
- [6] Kacprzyński B. *Planowanie eksperymentów. Podstawy matematyczne*. WNT. Warszawa. (1974)
- [7] Miller D.D., Goldnig N.S. 1949. *The gas requirements of molds. V. The minimum oxygen requirements for normal growth and for germination of six mold cultures*. Journal of Dairy Science; XXXII, 2.
- [8] Montgomery D. C. Runger G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. (Third Edition) John Wiley & Sons, Inc. (2003)
- [9] Nalimov V.V. *The theory of experiment*. Nauka, Moskwa 1971.
- [10] Neumeister B., Beseenthal I., Böhlmeier B.O., *Diagnostyka Laboratoryjna*, pod redakcją Pietruczuk M., Bartoszek-Tyczkowska A., (redakcja wydania II polskiego), Elsevier Urban & Partner (2013)
- [11] Piotrowski J.Z. Patent 180999. *Indywidualny system nawiewny*. Urząd Patentowy RP nr 315305.
- [12] PN – 89 – 04111/02,03 *Ochrona czystości powietrza. Badania mikrobiologiczne. Oznaczanie liczby grzybów mikroskopowych w powietrzu atmosferycznym (imisja) przy pobieraniu próbek metodą aspiracyjną i sedymentacyjną*.
- [13] Vakil J.R., Raghavendra Rao L.R., Bhattacharyya P.K. *Effect of CO₂ on the germination of conidiospores of Aspergillus niger*. Archiv für Mikrobiologie 39, (1961) 53-57.

Badania współfinansowane były z Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w ramach Projektu pt. „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”, Działanie 1.1 PO IG Poddziałanie 1.1.2, umowa nr POIG 01.01.02-10-106/09-00.



ENERGY CONSUMPTION AND FINAL ENERGY DEMAND FOR HEATING IN EDUCATIONAL BUILDINGS - IDENTIFICATION OF THE PROBLEM

Piotr LIS*, Jolanta PIESYK

*Politechnika Częstochowska, Instytut Inżynierii Środowiska, Zakład Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji
ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa, e-mail: polis@is.pcz.czest.pl*

Summary: This work presents the selected results of examinations connected with an annual energy consumption C_H and annual final energy demand $Q_{k,H}$ for heating and conducted on the group of educational buildings. The presented analysis and its results regard the group including 46 of 50 educational buildings, which form a municipal group of the buildings of this type and in which the educational institutions are located. The purpose of presented analysis was to examine the influence of possible occurrence and level of differences between the annual energy consumption C_H and annual final energy demand $Q_{k,H}$ for heating of examined buildings. The realization of this purpose is the basis for further research and analysis aimed at determining the dominant reasons of mentioned differences, establishing their level and propose a calculative method for reducing the differences between the values “picturing” the thermal needs of educational buildings in actual (energy consumption C_H) and theoretical (final energy demand $Q_{k,H}$) conditions.

Keywords: educational buildings, energy certification, energy consumption, final energy demand, heating.

1. INTRODUCTION

The calculative methods, which are applied in various fields of engineering, are usually a certain kind of theoretical approximation of reality. The main problem, which occurs here, is the degree of consistency of theoretical description of some phenomenon or process with the actual conditions of its course.

The deviations from a full consistency of actual conditions and theoretical assumptions occur also in case of building's heating. The building is considered as a constructional and installation entirety and constitutes a set of many installation, architectonic-building, constructional-material and operational properties, which have a direct or indirect connection with its heating.

When preparing a building energy certificate, one of the basic calculated quantities is the annual final energy demand $Q_{k,H}$ for heating. Not so long ago, also the thermal power (q) and the seasonal heat demand (Q) in a standard heating season were one of the basic quantities calculated in the projects of heating systems. Several years ago, in the design studies, the value of thermal power (q) was replaced by so-called design heat load, which is calculated according to PN EN ISO 12831:2006. However, there are no obstacles to use still the thermal power (q) in various considerations. One should only remember to apply only one of mentioned quantities consistently. A change of methodology in the design calculations regards also the seasonal heat demand (Q) for buildings' heating. In spite of the differences occurring in physical interpretation and the method of calculation of these quantities, all of them can be considered as theoretical, in contrast with the annual energy consumption C_H for building heating, the amount of which was determined by measurement and, in a sense, “describes the actual conditions of heating”. The value of energy consumption C_H is the effect of, inter alia, the duration of the heating season and the conditions inside and outside of a room. Estimated and simplified calculations of the annual final energy demand $Q_{k,H}$ for heating based on the known value of thermal power (q) are also used in the engineering practice. The using of available base quantities for calculation of sought quantities, the physical interpretation of which is often different from the “base”, is not a new phenomenon [1, 2, 3, 4, 5] and, despite of its disadvantages, it will be probably still applied. Despite the simplifications introduced in such cases, the obtained results of calculations should correlate with the results of measurements.

It should be so also in cases of theoretical annual final energy demand $Q_{k,q,H}$ for heating, calculated on the basis of the thermal power q , theoretical annual final energy

*Autor korespondencyjny, e-mail: polis@is.pcz.czest.pl

demand $Q_{k,H}$ for heating used in energy certification of buildings and the actual (measured directly or indirectly) annual energy consumption C_H for heating. The connection between discussed quantities should be the stronger, the better are rendered the heating conditions and the specificity of an operated object.

2. DESCRIPTION OF CONDUCTED EXAMINATIONS AND ANALYSES

The association between the energy consumption C_H for heating and the annual final energy demand $Q_{k,q,H}$ for heating, calculated on the basis of the thermal power q as well as the discrepancies appearing here [5] and mentioned using of q values for estimating of the annual final energy demand (Q) in the engineering practice were the main reason inducing to undertake the examinations and analyses.

The presented analysis and its results are a fragment of wider examinations of educational buildings, which were constructed in years 1913÷1992. They form a full municipal complex of 50 objects, in which the primary schools and junior high schools are located. The full statistical examinations, which were carried out in years 1992÷2016, included all the units of this complex and they were conducted by stages, in cooperation with the Municipal Office. A method of ad hoc statistical census was applied here, with using of selected measures of descriptive statistics and correlation analysis. The statistical observation was carried out by correspondence and direct surveys, interviews, site inspections and personally conducted measurements. The research material obtained in this manner is a primary material, collected especially for the purposes of conducted statistical examinations.

The heating season used in the analyses was characterized by the average outdoor temperature of air for analyzed period and determined area (town) $\Theta_{e, av} = + 2.9$ °C and the duration 230 days. This season can be considered as typical for multiannual period in statistical respect (min. 30 years), which was confirmed by a positive result of testing a hypothesis on its statistical typicality. The average temperature inside of heated educational buildings achieved the value $\Theta_{int, av} = + 19.9$ °C. The average grade of thermal comfort assessment made by the employees and students in examined objects amounted to 3.98 point in 7-point scale (from 1 to 7) and is within so-called thermal comfort zone. The procedure described above was conducted in order to assure that there are no too big differences of temperatures in heated rooms between examined buildings, which could have a significant influence on analyzed values of annual (seasonal) energy consumption C_H for heating.

In the examined group, 23 educational buildings were provided with heat for heating by HPC (Heat Power Company), while 27 buildings had their own boiler-rooms.

The amount of energy (C_H) consumed in a base heating season (in the year) was determined in two manners, depending on the source supplying the heat to the central heating system. In the buildings equipped with remote systems of central heating the actual energy consumption (C_H) was determined on the basis of readings from installed heat meters, with the measuring accuracy not lower than 2%. In case of own gas or coal-coke boiler-rooms, the amount of annual energy consumption (C_H) was calculated on the basis of information on fuel consumption in the base heating season, kind of used fuel and its calorific value, average nominal efficiency and estimated average operational efficiency of the central heating boilers, kind of losses in the heat production and their average levels for various types of boilers.

Table 1. Selected measures of statistical description for the values characterizing 46 of 50 educational buildings forming the municipal group of objects of this type

Tabela 1. Wybrane miary opisu statystycznego dla wielkości charakteryzujących 46 z 50 budynków edukacyjnych tworzących miejską zbiorowość tego typu obiektów

Value x	Average value $\bar{x}$	Stand. deviation $s(x)$
Cubic capacity V , m ³	14682.37	9674.55
Usable area A_u , m ²	3194.09	2161.41
Number of classrooms, rooms	21	12
Average area of classroom, m ²	50.36	8.45
Relation of the building external partitions' area to the building volume A/V , m ⁻¹	0.40	0.09
Relation of the classrooms' area to the usable area, -	0.37	0.10
Relation of windows' area to the area of facade, -	0.25	0.05
Weighted average heat transfer coefficient for external partitions, W/(m ² K)	1.27	0.20
Thermal power for heating q , kW	323.38	235.15
Index of thermal power for heating of 1 m ³ of cubic capacity q/V , W/(m ³ a)	21.93	5.11
Annual energy consumption for heating in standard heating season C_H , GJ/a	1996.52	1266.14
Index of annual energy consumption for heating of 1 m ³ of cubic capacity in standard season (C_H / V), GJ/(m ³ a)	138.36	39.26

The material presented in this work is a fragment of wider analysis and regards 46 of 50 educational buildings, in which the educational institutions are located (data for 4 objects were questionable in the author's opinion). The total amount of heat used for heating of analyzed objects was $\Sigma Q = 91.840$ GJ/a, with their total cubic capacity

$\Sigma V = 675.389 \text{ m}^3$ and heated area $\Sigma A_u = 146.013 \text{ m}^2$. Average values of $C_{H,av}$ (0.10) and q_{av} (0.10), calculated after eliminating of 10% of extreme values of Q and q , constitute about 96% of average values for the entire analyzed group. About 70 ÷ 80% of analyzed buildings were considered as typical in respects of the actual energy consumption (C_H) for heating of rooms and the thermal power (q). The basic characteristic of this group of buildings is presented in the Table 1. The statistical description of this group does not differ significantly from the description of the entire group of 50 buildings [4].

3. RESULTS AND DISCUSSION OF EXAMINATIONS' RESULTS

Bearing in mind the realization of article purpose which will be the basis for further research and analysis the, following important questions arise:

- 1) Are there discrepancies between the actual and theoretical heating conditions of the analyzed buildings, which are quantitatively characterized by appropriate values?;
- 2) What is a quantitative range of possible discrepancies?;
- 3) What may be the reasons of such situation?

Before calculations, the examined buildings were sorted from the smallest to largest annual energy consumption for heating. The energy consumption for building heating is strongly related to its size. In order to give an answer to the first question, the annual final energy demand $Q_{k,H}$ for heating used in energy certification of buildings were calculated, the final energy demand $Q_{k,q,H}$ for heating calculated on the basis of the thermal power q were calculated and presented in earlier studies among others: [4, 5] and they were compared graphically with the annual energy consumption C_H for heating (Fig. 1÷3). Based on the methodology of energy certification of buildings in Poland and EN ISO 13790:2008 "Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling", calculations $Q_{k,H}$ were made. At the stage of the diagnosis problems, the calculation $Q_{k,H}$ was made for two quantities of ventilation air change. The annual final energy demand $Q_{k,H}$ for heating were calculated for $n=1 \text{ h}^{-1}$ and $n=3 \text{ h}^{-1}$. The results of analysis are shown on the graphs (Fig. 1÷3) and their interpretation should enable to answer the last of the previously asked questions in the next, more detailed analysis. In order to answer the second question, the differences between the theoretical values - the annual final energy demand $Q_{k,H}$ for heating, the final energy demand $Q_{k,q,H}$ for heating calculated on the basis of the thermal power q and the actual annual energy consumption C_H for heating were calculated and presented in Figs. 4÷6.

In addition, Fig. 7 show trends in changes in energy demand and energy consumption in educational buildings. Fig. 8 show trends in differences between:

- annual final energy demand and annual energy consumption for heating: $(Q_{k,H} - C_H) \cdot 100\%$. The annual final heat demand $Q_{k,H}$ for heating was calculated for two quantities of air exchange $n=1 \text{ h}^{-1}$ and $n=3 \text{ h}^{-1}$;
- annual final energy demand calculated on the basis of the thermal power q and annual energy consumption C_H for heating: $(Q_{k,q,H} - C_H) \cdot 100\%$;

One should remember, however, that the graphs were drawn for the group of buildings diverse in respect of properties, which influence significantly on the amount of heat consumed for heating.

All figures are presented at the end of the article.

The analysis of calculated values and graphs (Fig. 1 ÷ 8) reveals the differences between annual energy consumption (C_H) for heating and calculated annual final energy demand ($Q_{k,H}$, $Q_{k,q,H}$). Occurrence of these differences confirms the course of trend lines for changes in analyzed quantities, which are shown on the graphs – Fig. 7.

Calculated annual final energy demand $Q_{k,H}$ for $n=3 \text{ h}^{-1}$ is bigger by 11.4% and 192.2 GJ, on the average, than the actual energy consumption for heating C_H , but final energy demand $Q_{k,H}$ for $n=1 \text{ h}^{-1}$ is smaller by 20.9% and 450.0 GJ, on the average, than the actual energy consumption for heating C_H . Calculated annual final energy demand $Q_{k,q,H}$ is bigger by 25.2% and 794.4 GJ, on the average, than the actual energy consumption for heating C_H . However, there are few buildings, in which the situation is opposite.

The courses of trend lines for the theoretical value ($Q_{k,H}$, $Q_{k,q,H}$) and for actual energy consumption for heating (C_H) are similar on all graphs, with presented in Fig. 7. In each of cases presented in Fig. 7, the directions of trend lines for analyzed quantities are less or more divergent. It means that the increase of calculated value ($Q_{k,H}$, $Q_{k,q,H}$) is quicker than the increase of the actual energy consumption for heating (C_H). Simultaneously, it causes the increase of the value of differences $((Q_{k,H} - C_H), (Q_{k,q,H} - C_H))$ for these objects.

4. SUMMARY

To sum up, it can be repeated that the occurrence of differences between the annual energy consumption (C_H) and the annual final energy demand ($Q_{k,H}$) for buildings heating, calculated in proposed manner, was found. The quantitative level $(Q_{k,H} - C_H)$ is different in analyzed educational buildings. It does not result only from the differences between the methodology of $Q_{k,H}$ calculation and the actual heating process, which results in generating of the annual energy consumption (C_H) for heating of the examined buildings. If it is so, then it seems that the points

of data for individual buildings should overlap with the trend of changes in $Q_{k,H}$ and C_H values (Fig. 1, 2, 4, 5).

A phenomenon, which was observed for several buildings and consists in a considerable diversity between the values of annual final energy demand ($Q_{k,H}$, $Q_{k,q,H}$) and annual energy consumption (C_H) for heating of rooms in relation to its average level, in connection with presented results, may prove:

- an incorrect determination of thermal power (q) or incorrect making energy certificate and incorrect assumptions used in calculating the values of annual final energy demand $Q_{k,H}$ for the part of objects. Such errors may be a reason of insufficient heating of educational buildings or paying of excessive fixed duties for thermal power (q);
- an improper operation of schools in the scope of appropriate ventilation of rooms, which is always connected with cubic capacity of examined buildings, mentioned here.

Proposed comparison of the theoretical ($Q_{k,H}$, $Q_{k,q,H}$) and actual (C_H) values and the graphical methods applied in the analysis may be used in order to determine the scope of such incorrectnesses, in the analysis of heating of similar groups of educational buildings and also as a help in providing other information connected with the specificity of such objects' heating.

A relation of the difference's value ($Q_{k,H} - C_H$) to the value of C_H expressed in GJ and percentage is also diverse in individual objects.

The values specified above have a certain common property, which is a direct or indirect connection with the size of examined buildings. During the years 1913 ÷ 1992, when the analyzed objects were constructed, a tendency toward the construction of bigger and bigger educational objects was noticed. All these reasons incline to the interpretation that presented relationships are, to a bigger or smaller degree, determined by the size of examined objects, which is described quantitatively by their cubic capacity (V) and the factors connected with that. Thus, the cubic capacity of examined objects has a significant and often dominant influence on analyzed relationships. Obviously, also the other factors have their influence, but it is less significant.

Does this diversity remain dependent on certain factors characterizing the selected objects, such as, inter alia, the architectonic shape of a building, energy consumption by heating and thermo-insulating power of external particles? Answers to this question will need to be made during further research and analysis aimed at determining the dominant reasons of mentioned differences, establishing their level and propose a calculative method for reducing the differences between the values "picturing" the thermal

needs of educational buildings in actual (energy consumption C_H) and theoretical (final energy demand $Q_{k,H}$) conditions.

ZUŻYCIE ENERGII I ZAPOTRZEBOWANIE ENERGII KOŃCOWEJ DO OGRZEWANIA W BUDYNKACH EDUKACYJNYCH – IDENTYFIKACJA PROBLEMU

Streszczenie: W pracy zaprezentowano wybrane wyniki badań zbiorowości budynków edukacyjnych związane z rocznym zużyciem energii C_H i rocznym zapotrzebowaniem na energię końcową do ogrzewania $Q_{k,H}$. Przedstawiona analiza i jej wyniki dotyczą grupy 46 spośród 50 budynków edukacyjnych tworzących miejską zbiorowość obiektów tego typu, w których mieszczą się placówki oświatowe. Celem zaprezentowanej analizy było identyfikacja i zbadanie poziomu różnic pomiędzy rocznym zużyciem energii C_H i rocznymi zapotrzebowaniem na energię końcową $Q_{k,H}$ do ogrzewania badanych budynków. Osiągnięcie wymienionego celu stanowi podstawę do dalszych badań i analiz zmierzających do ustalenia dominujących przyczyn wspomnianych różnic, określenia ich poziomu i zaproponowania sposobu obliczeniowego zmniejszenia różnic pomiędzy wielkościami „obrazującymi” potrzeby cieplne budynków edukacyjnych w warunkach rzeczywistych (zużycie energii C_H) i teoretycznych (zapotrzebowanie na energię końcową $Q_{k,H}$).

Słowa kluczowe: budynki edukacyjne, charakterystyka energetyczna, zużycie energii, zużycie energii końcowej, ogrzewanie.

Literatura

- [1] Corgnati S. P., Corrado V., Filippi M.: A method for heating consumption assessment in existing buildings: A field survey concerning 120 Italian schools. *Energy and Buildings* 40 (2008), s. 801–809
- [2] Karperkiewicz K.: Ocena potrzeb cieplnych budynku na podstawie monitoringu dostarczanej energii. *Czasopismo Techniczne – Budownictwo*, nr 5-B/2006 Zeszyt 5-B. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, s.251-258
- [3] Lis P.: Cechy budynków edukacyjnych a zużycie ciepła do ogrzewania. *Seria Monografie nr 263*. Częstochowa Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej (2013), 361 s.
- [4] Lis P.: The actual and calculated thermal needs of educational buildings. W: *Environmental Engineering*. Taylor & Francis Group, London, UK, (2013), s. 405-416
- [5] Lis P., Lis A.: The seasonal heat demand for heating, calculated on the basis of peak power values in educational buildings. *Czasopismo Techniczne – Budownictwo*, nr 3-B/2014. Zeszyt 3-B. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków (2014), s. 281-289

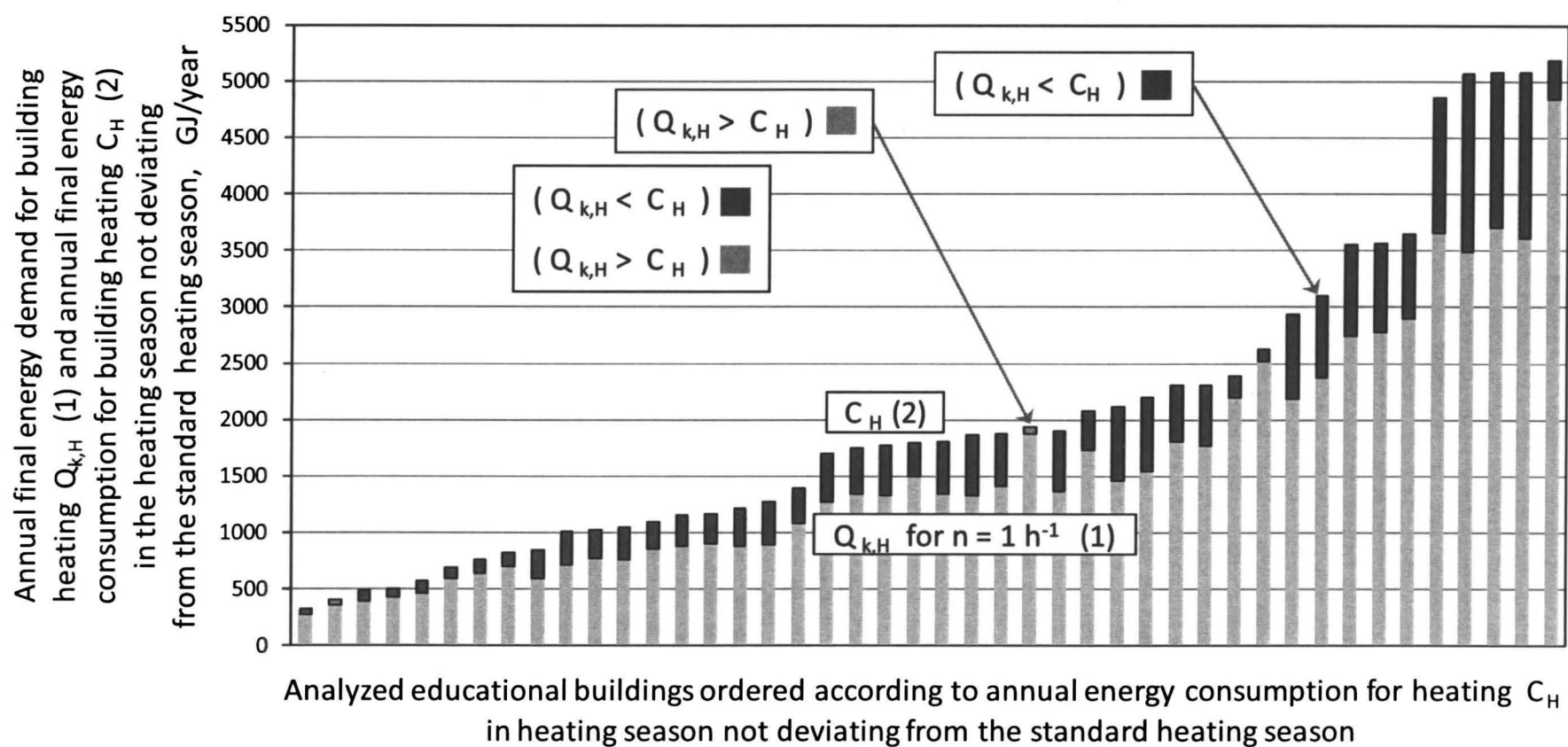


Fig. 1. Annual final energy demand for building heating $Q_{k,H}$ for $n = 1$ (1) and annual final energy consumption for building heating C_H (2) in the heating season not deviating from the standard heating season, GJ/year

Rys. 1. Roczne zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania budynku $Q_{k,H}$ dla $n = 1$ (1) i roczne zużycie energii do ogrzewania budynku C_H (2) w sezonie grzewczym nie odbiegającym od standardowego sezonu grzewczego, GJ/rok

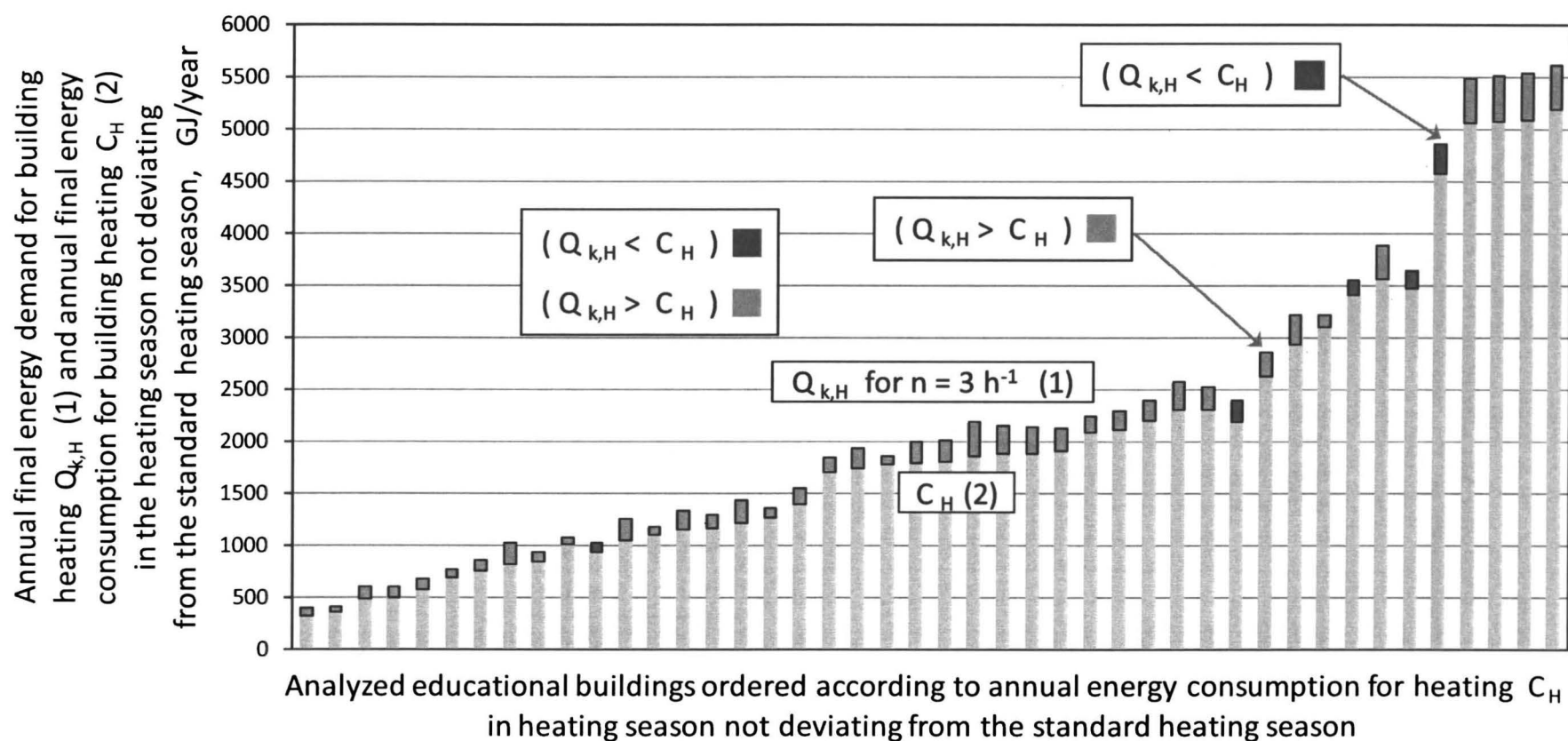


Fig. 2. Annual final energy demand for building heating $Q_{k,H}$ for $n = 3$ (1) and annual final energy consumption for building heating C_H (2) in the heating season not deviating from the standard heating season, GJ/year

Rys. 2. Roczne zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania budynku $Q_{k,H}$ dla $n = 3$ (1) i roczne zużycie energii do ogrzewania budynku C_H (2) w sezonie grzewczym nie odbiegającym od standardowego sezonu grzewczego, GJ/rok

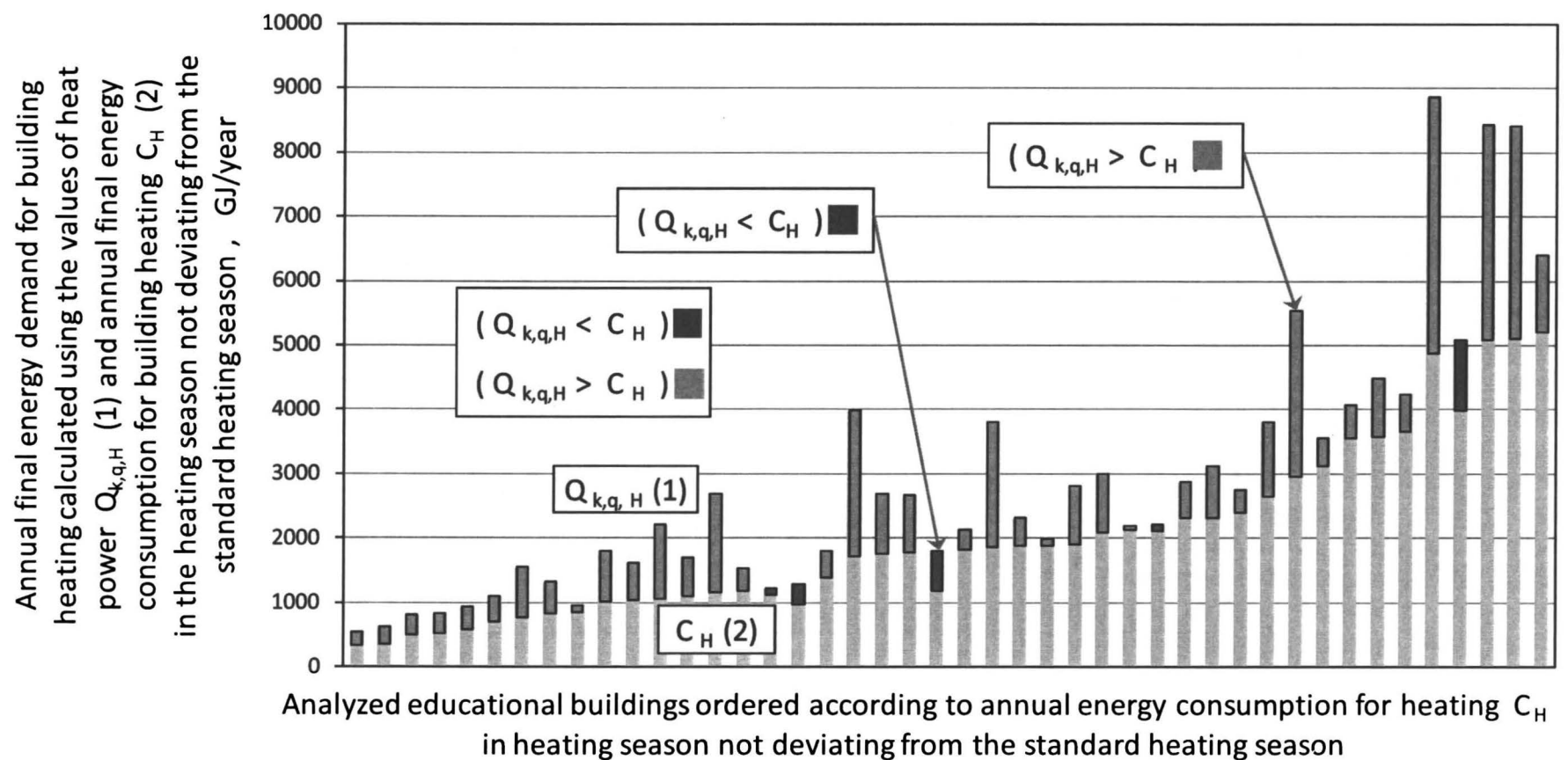


Fig. 3. Annual final energy demand for building heating $Q_{k,q,H}$ (1) and annual final energy consumption for building heating C_H (2) in the heating season not deviating from the standard heating season, GJ/year
 Rys. 3. Roczne zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania budynku $Q_{k,q,H}$ (1) i roczne zużycie energii do ogrzewania budynku C_H (2) w sezonie grzewczym nie odbiegającym od standardowego sezonu grzewczego, GJ/rok

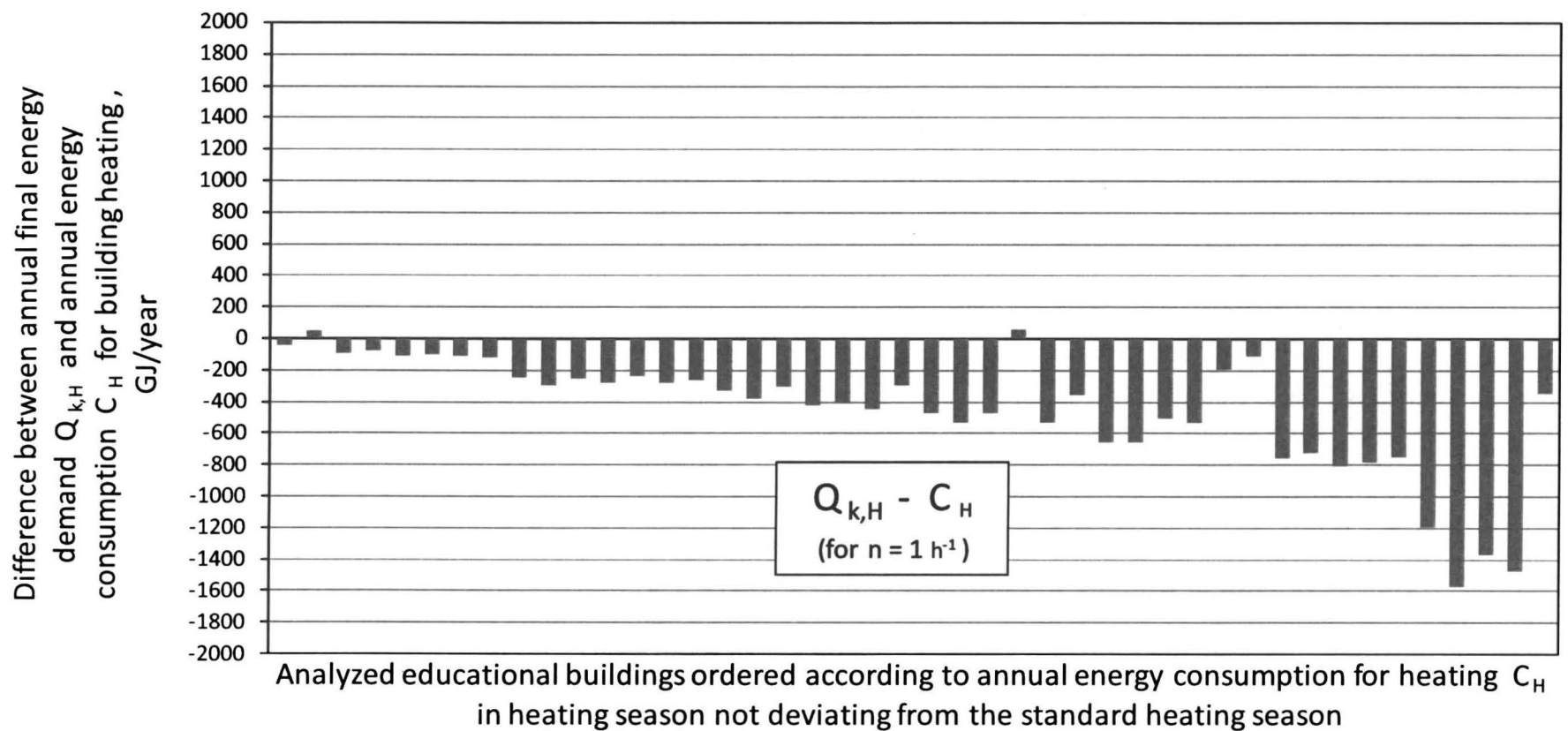


Fig. 4. Differences between annual final energy demand for building heating $Q_{k,H}$ for $n = 1$ (1) and annual final energy consumption for building heating C_H (2) in the heating season not deviating from the standard heating season, GJ/year
 Rys. 4. Różnice pomiędzy rocznym zapotrzebowaniem na energię końcową do ogrzewania $Q_{k,H}$ dla $n = 1$ (1) i rocznym zużyciem energii do ogrzewania budynku C_H (2) w sez. grzewczym nie odbiegającym od standardowego sez. grzewczego, GJ/rok

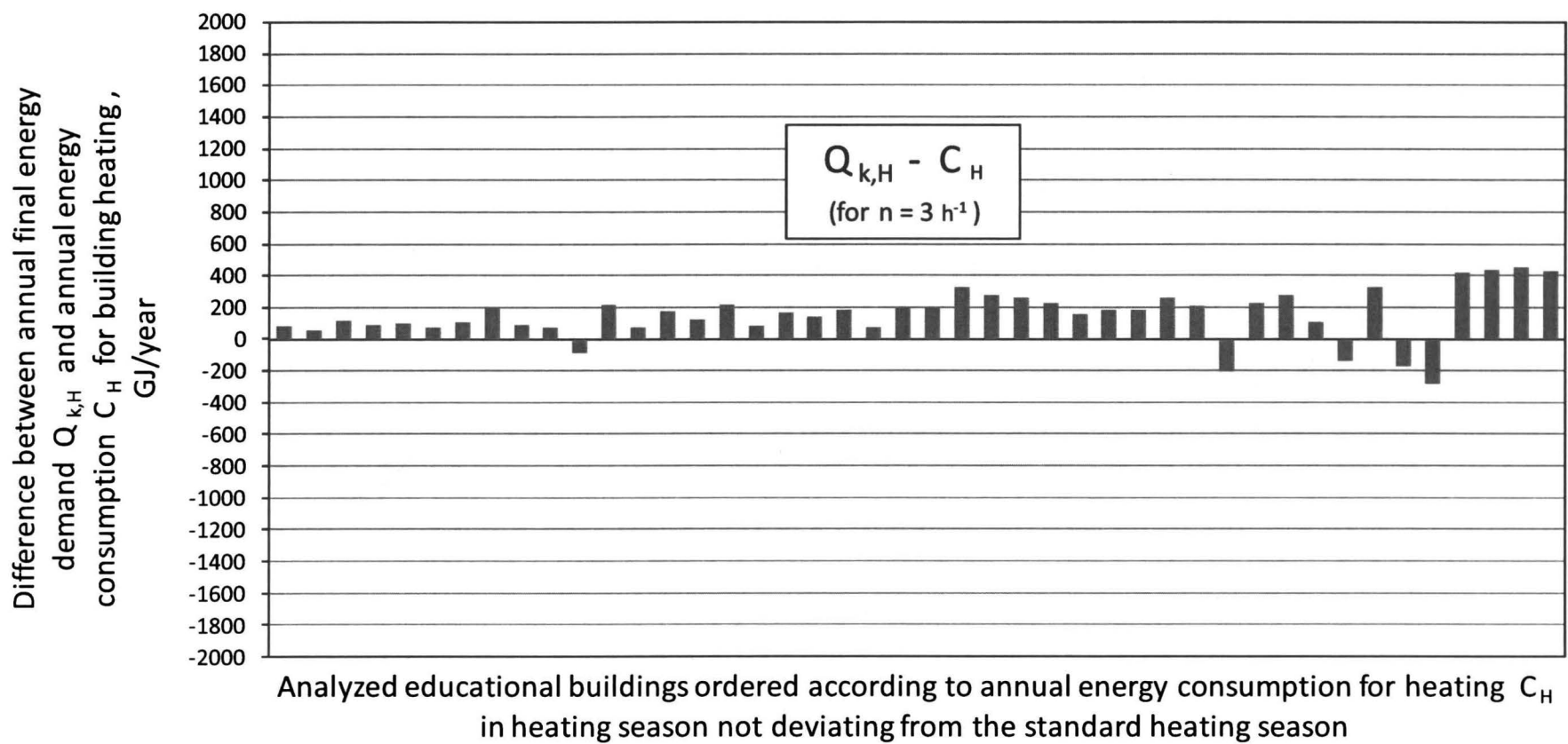


Fig. 5. Differences between annual final energy demand for building heating $Q_{k,H}$ for $n = 3$ (1) and annual final energy consumption for building heating C_H (2) in the heating season not deviating from the standard heating season, GJ/year

Rys. 5. Różnice pomiędzy rocznym zapotrzebowaniem na energię końcową do ogrzewania $Q_{k,H}$ dla $n = 3$ (1) i rocznym zużyciem energii do ogrzewania budynku C_H (2) w sez. grzewczym nie odbiegającym od standardowego sez. grzewczego, GJ/rok

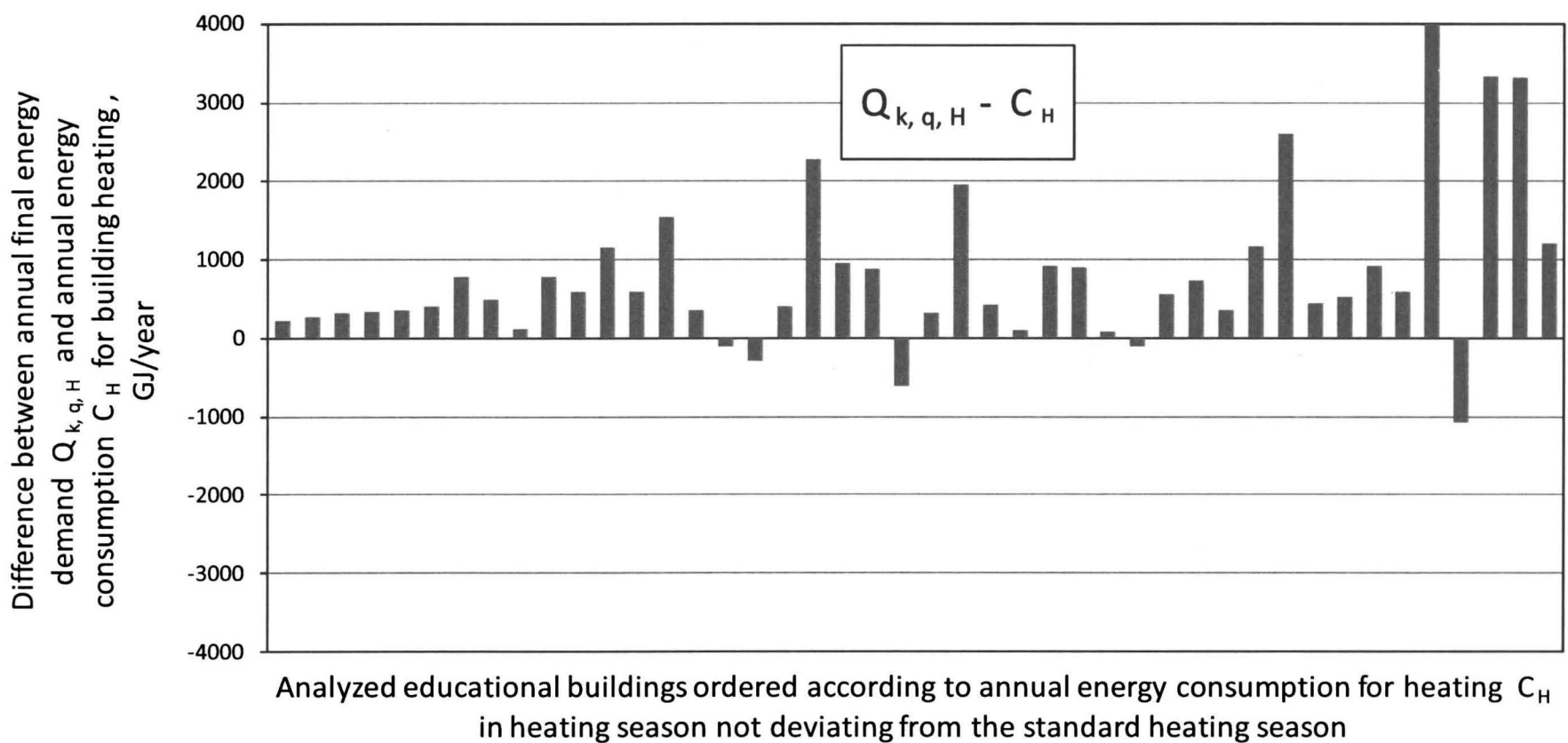


Fig. 6. Differences between annual final energy demand for building heating $Q_{k,q,H}$ (1) and annual final energy consumption for building heating C_H (2) in the heating season not deviating from the standard heating season, GJ/year

Rys. 6. Różnice pomiędzy rocznym zapotrzebowaniem na energię końcową do ogrzewania $Q_{k,q,H}$ (1) i rocznym zużyciem energii do ogrzewania budynku C_H (2) w sez. grzewczym nie odbiegającym od standardowego sez. grzewczego, GJ/rok

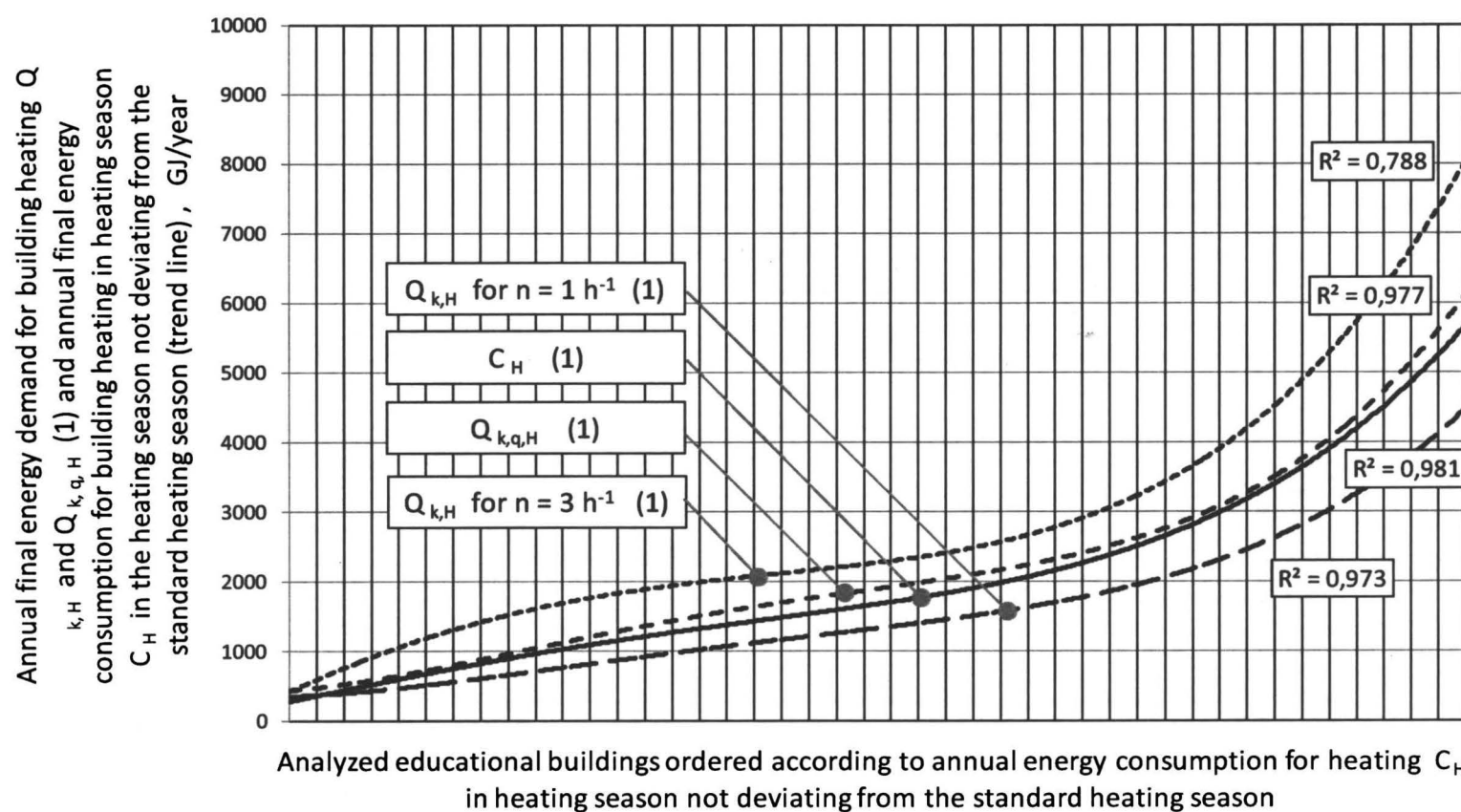


Fig. 7. Trend line for annual final energy demand for building heating $Q_{k,H}$ and $Q_{k,q,H}$ (1) in analyzed educational buildings ordered according to growing annual energy consumption for heating C_H in heating season not deviating from the standard heating season, GJ/year

Rys. 7. Linie trendu dla rocznego zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania budynku $Q_{k,H}$ i $Q_{k,q,H}$ w analizowanych budynkach edukacyjnych uporządkowanych według rosnącego rocznego zużycia energii do ogrzewania C_H w sezonie grzewczym nie odbiegającym od standardowego sezonu grzewczego, GJ/rok

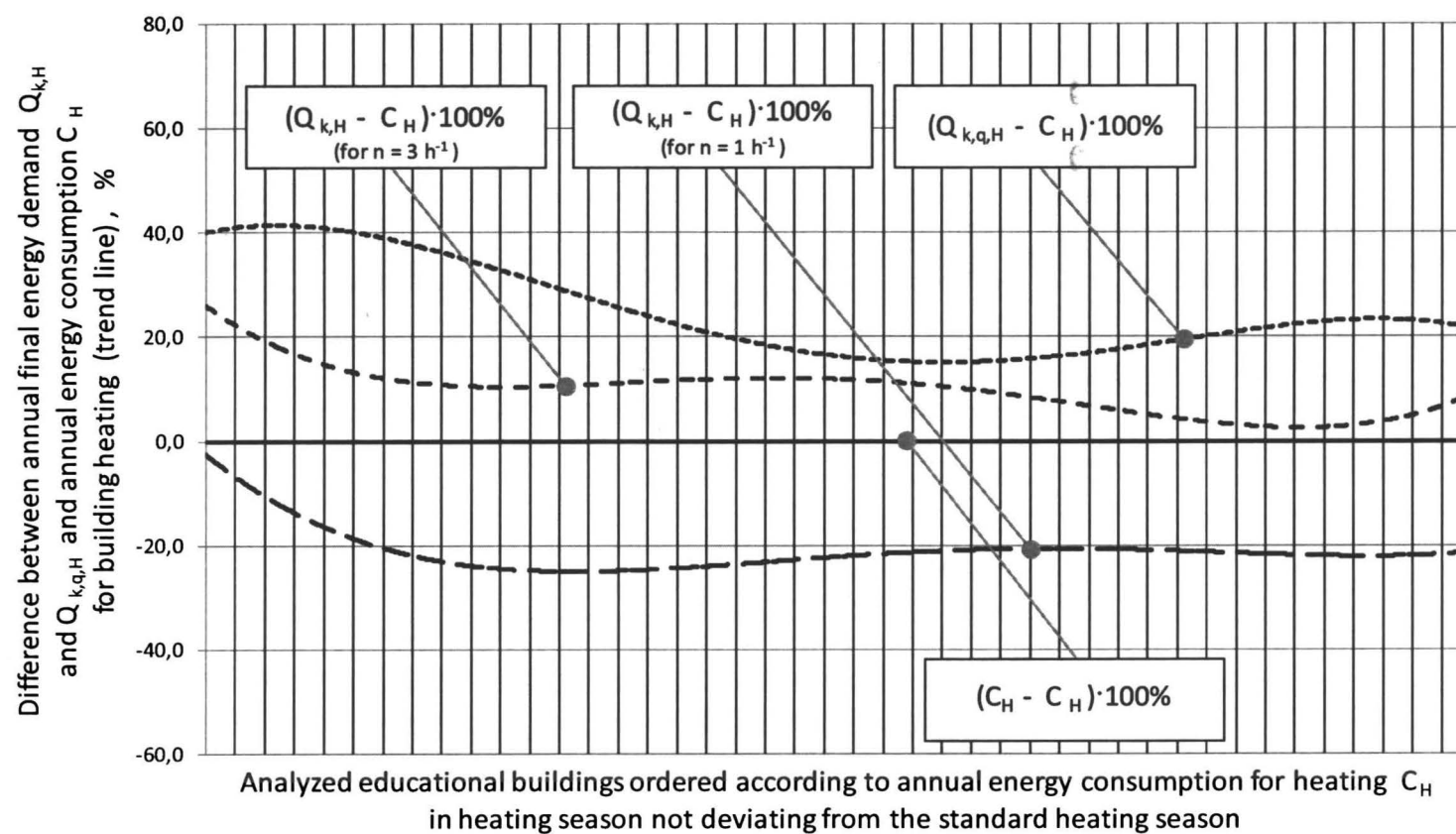
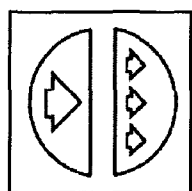


Fig. 8. Trend line for difference between annual final energy demand $Q_{k,H}$ and $Q_{k,q,H}$ (1) and annual energy consumption C_H (2) for heating in analyzed educational buildings ordered according to growing annual energy consumption for heating C_H in heating season not deviating from the standard heating season, %

Rys. 8. Linia trendu dla różnicy pomiędzy rocznym zapotrzebowaniem na energię końcową $Q_{k,H}$ lub $Q_{k,q,H}$ (1) a rocznym zużyciem energii C_H (2) do ogrzewania w analizowanych budynkach edukacyjnych uporządkowanych według rosnącego rocznego zużycia energii do ogrzewania C_H w sezonie grzewczym nie odbiegającym od standardowego sezonu grzewczego, %



WPLYW POKRYĆ ŁAW KOŚCIELNYCH NA CHARAKTERYSTYKI POGŁOSOWE WNĘTRZA ZABYTKOWEGO KOŚCIOŁA DREWNIANEGO

Michał MARCHACZ*, Antonina ŻABA

*Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: Michal.Marchacz@polsl.pl, Antonina.Zaba@polsl.pl*

Streszczenie: Praca zawiera ocenę możliwości korygowania pogłosowości wnętrza zabytkowych kościołów drewnianych. Przedstawione badania dotyczą wpływu pokryć ław kościelnych na charakterystykę pogłosową wnętrza zabytkowego, drewnianego kościoła pw. Narodzenia NMP zlokalizowanego w Szalszy w województwie śląskim. W pracy zmierzono czas pogłosu wnętrza kościoła. Pomiarów dokonano dla dwu wariantów – z uwzględnieniem miękkich pokryć ław kościelnych oraz bez pokryć ław kościelnych. Na podstawie badań czasu pogłosu wyznaczono szereg parametrów oceny jakości akustycznej wnętrza (STI , D_{50} , C_{80} , stosunek basów oraz stosunek trebli).

Słowa kluczowe: czas pogłosu, zabytkowy kościół drewniany, kościół w Szalszy, pokrycia ław kościelnych.

1. WPROWADZENIE

Czas pogłosu jest jednym z głównych parametrów mających wpływ na charakterystykę akustyczną wnętrza. Potrzeba korekty tejże charakterystyki może wynikać z negatywnej oceny użytkowników wnętrza w procesie jego bieżącej eksploatacji lub konieczności dostosowania wnętrza do planowanej zmiany sposobu jego użytkowania. Typowe metody kształtowania pogłosowości wnętrza bazują najczęściej na dodawaniu do wnętrza materiałów pochłaniających lub rozpraszających dźwięk. W przypadku wnętrza zabytkowych projektant musi liczyć się z szeregiem ograniczeń w przekształcaniu wnętrza. Wynika to z obecności we wnętrzach zabytkowych cennego wystroju (np. malowidła na ścianach) i wyposażenia (np. ołtarze, ambony, ławki).

Również cechy geometryczne tego typu wnętrza (kształt danego wnętrza, jego układ i wielkość) stanowią walor podlegający ochronie i jednocześnie wyzwanie dla projektanta.

W pracy rozpatrzono jedną z mniej inwazyjnych możliwości kształtowania pogłosowości zabytkowego wnętrza, jaką jest pokrycie siedzisk drewnianych ław materiałami pochłaniającymi dźwięk. Ze względu na panujące w takich wnętrzach warunki klimatyczne (zwykle występuje brak ogrzewania, rzadko ma ono formę doraźną w postaci chwilowego nawiewu ciepłego powietrza), a także komfort użytkowania, siedziska ław wykłada się często miękkimi pokryciami. Zwykle mają one formę dopasowanych do kształtu i wielkości siedzisk ław poduszek wypełnionych miękkim materiałem lub rozkładanych na nich „dywaników” z wykładzin dywanowych.

W ramach prowadzonych w obiekcie działań autorzy wykonali badania akustyczne pogłosowości wnętrza dla dwóch przypadków. W pierwszej sytuacji pomiarowej zmierzono czasy pogłosu we wnętrzu kościoła dla sytuacji bez miękkich pokryć ław kościelnych. W dalszej kolejności przeprowadzono analogiczną procedurę pomiarową dla sytuacji z miękkimi pokryciami ułożonymi na ławach. Na podstawie tak przeprowadzonych pomiarów wyznaczono czasy pogłosu rozpatrywanego wnętrza. W dalszej kolejności, w oparciu o powyższe badania, wyznaczono inne, wybrane parametry oceny jakości akustycznej wnętrza (STI , D_{50} , C_{80} , stosunek basów oraz stosunek trebli) opisane w dalszej części artykułu.

2. BADANY OBIEKT

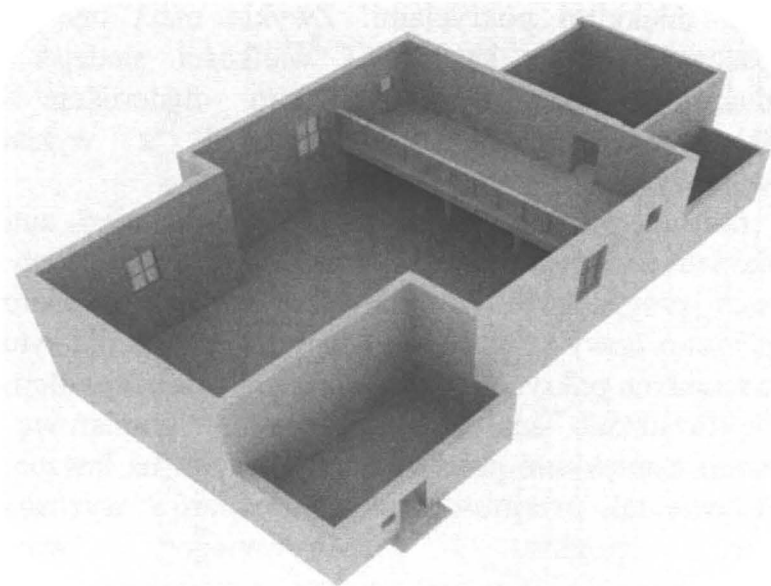
Badania przeprowadzono w zabytkowym, drewnianym kościele pw. Narodzenia NMP zlokalizowanym w Szalszy w województwie śląskim (rys. 1). Kościół otoczony jest cmentarzem i pełni funkcję kościoła filialnego. Obiekt składa się z wieży, nawy, prezbiterium, zakrystii i pomieszczenia gospodarczego. Bryła kościoła, w swojej

*Autor korespondencyjny, e-mail: Michal.Marchacz@polsl.pl

obecnej postaci, została ukształtowana w okresie od XVI do XX wieku [1]. W roku 1968 znaczna część kościoła spłonęła. W tym samym roku kościół poddano rekonstrukcji [2].



Rys. 1. Kościół pw. Narodzenia NMP (filialny) w Szalszy, województwo śląskie, powiat tarnogórski, fot. M. Marchacz
Fig. 1. Church of Blessed Virgin Mary's (associated church) in Szalsza, silesia voivodeship, Tarnowskie Góry county, fot. M. Marchacz

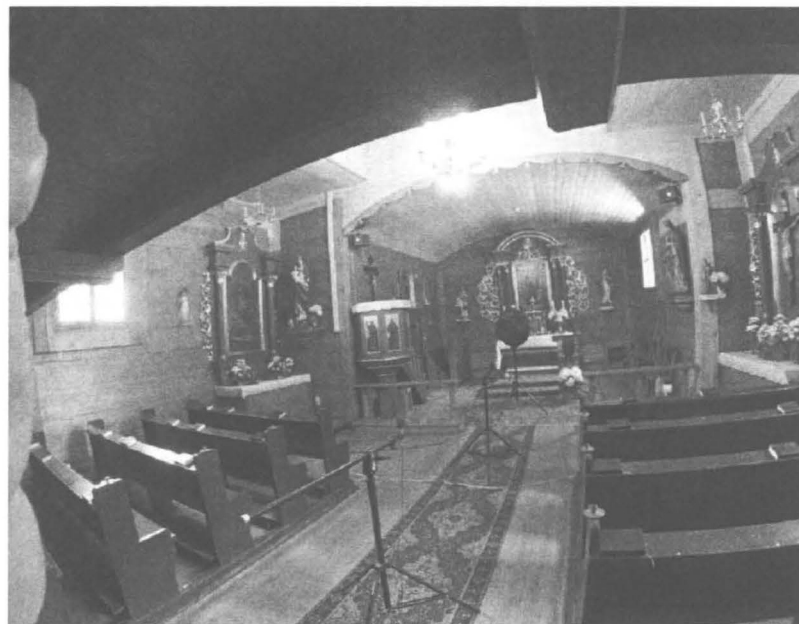


Rys. 2. Model kościoła filialnego w Szalszy (przekrojonego płaszczyzną poziomą) [3]
Fig. 2. Model of associated church in Szalsza, (sectional view by horizontal plane) [3]

Przedmiotem prezentowanych w artykule badań są nawa i prezbiterium. Czas ich budowy nie został precyzyjnie ustalony, ze względu na brak źródeł. Prawdopodobnie forma, którą dzisiaj możemy podziwiać pochodzi z XVIII w [2]. Wnętrze kościoła filialnego w Szalszy ograniczają wyłącznie przegrody z drewna. Obydwa pomieszczenia (nawa i prezbiterium) mają rzuty zbliżone do kwadratów i ściany o konstrukcji zrębowej (wieńcowej) z drewnianymi

drzwiami i niewielkimi oknami. Ściany od wewnątrz oszalowano deskami.

Prezbiterium przekryto pozornym sklepieniem - kolebką o łuku segmentowym (o niewielkiej strzałce). W nawie znajdują się zaskrzynienia, dlatego przekryta jest ona stropami położonymi na dwóch poziomach. W nawie znajduje się chór muzyczny. Podłogi wykonane zostały z desek i częściowo przykryte dywanami.



Rys. 3. Wnętrze nawy i prezbiterium kościoła filialnego w Szalszy wraz ze sprzętem pomiarowym, fot. M. Marchacz
Fig. 3. Interior of the nave and chancel in associated church in Szalsza with measurement devices, fot. M. Marchacz

Skromne wyposażenie kościoła wykonane jest głównie z drewna. W nawie znajdują się dwa ołtarze, ławki oraz organy. W prezbiterium ustawiono ołtarz na drewnianym podeście, ambonę, pulpit, sidilia i balaski.

Geometryczna charakterystyka wnętrza:

- powierzchnia przegród ograniczających wnętrz $A = 526,99 \text{ m}^2$,
- objętości obydwu pomieszczeń składających się na wnętrze $V = 512,41 \text{ m}^3$,
- współczynniki zwartości bryły $A/V = 1,03 \text{ m}$ [4].

Wybrane względne wskaźniki zwartości obliczone względem wybranych brył wynoszą odpowiednio dla:

- sześcianu $R_{cube} = 1,37$;
- sfery $R_{sfere} = 1,60$ [5 i 6].

3. OPIS BADAŃ

Badania pogłosowości wnętrza rozpatrywanego kościoła przeprowadzono w maju 2015. Poniżej zestawiono w podpunktach informacje obrazujące zakres oraz przebieg badań.

3.1. Metodologia

Procedurę pomiarową oparto na metodologii zawartej w normach PN-EN ISO 3382-1 [7] oraz PN-EN ISO 3382-2 [8]. W badaniach zastosowano metodę tzw. szumu przerywanego. Badano czasy zaniku dźwięku. W czasie pomiarów prowadzono monitoring temperatury oraz wilgotności powietrza. Parametry te były stałe.

3.2. Sprzęt

Jako źródło dźwięku użyto kuli głośnikowej (oznaczanej jako „K”) o dookolnej charakterystyce propagacji dźwięku sprzężonej z wzmacniaczem oraz generatorem szumu różowego produkcji Swantek.

Aparaturę odbiorczą stanowią:

- miernik Svan 958,
- dwa mikrofony ½ cala,
- przedwzmacniacze mikrofonowe,
- kalibrator akustyczny.

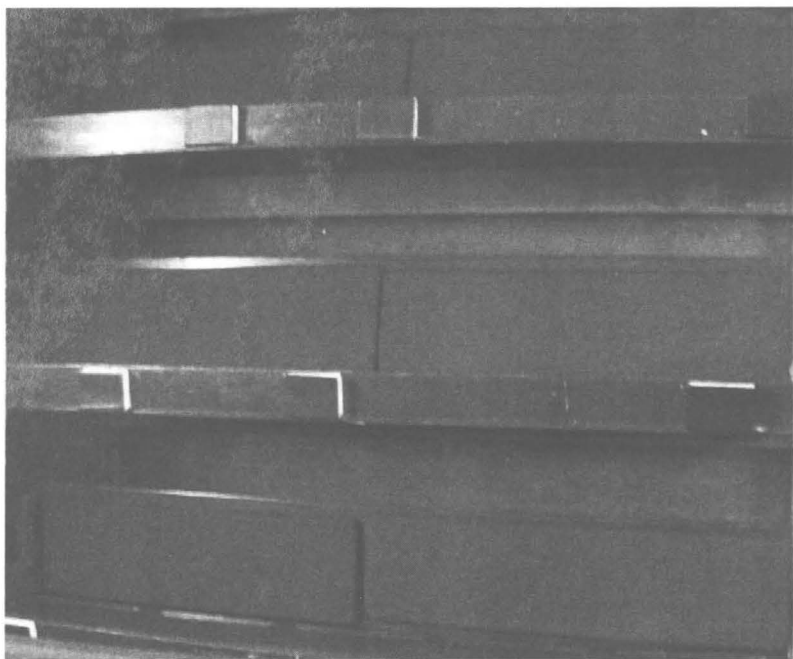
Przed przeprowadzeniem pomiarów sprzęt pomiarowy został poddany kalibracji celem zniwelowania ewentualnych rozbieżności pomiarowych.

3.3. Lokalizacja sprzętu

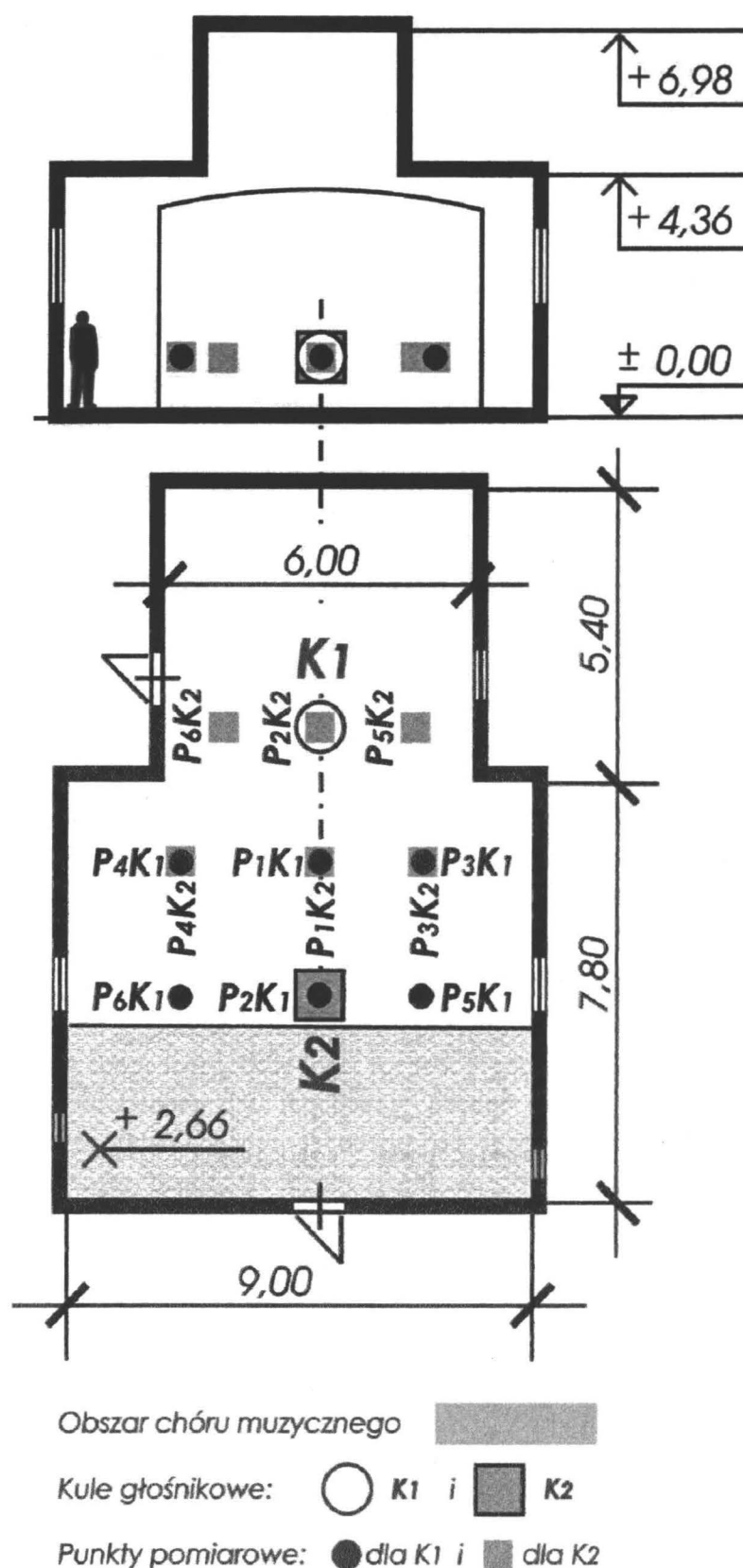
Przyjęto dwie lokalizacje kuli głośnikowej (rys.5):

- w prezbiterium, przed ołtarzem (K1),
- w nawie, w punkcie centralnym (K2).

Dla każdego z ustawień kuli głośnikowej przyjęto sześć indywidualnych, różnych od siebie pozycji mikrofonów pomiarowych (P1-P6).



Rys. 4. Pokrycia ław w kościele filialnym w Szałszy
Fig. 4. Covers of the pews in associated church in Szałsza



Rys. 5. Szkic rzutu i przekroju wnętrza kościoła filialnego Szałszy z rozmieszczeniem sprzętu pomiarowego, rys. A. Żaba

Fig. 5. Sketch of the view and intersection of interior for associated church in Szałsza, with measurement devices arrangement, draw A. Żaba

3.4. Warianty badań

Badania przeprowadzono dla dwóch wariantów:

- W1 - dla ławek kościelnych bez pokryć,
- W2 - dla ławek z siedziskami z założonymi miękkimi pokryciami wykonanymi z syntetycznej gąbki obszytej materiałem. Grubość pokryć wynosiła około 3÷4 cm. Sumaryczna powierzchnia pokryć była zasadniczo zbliżona

do powierzchni siedzisk i wynosiła około 12 m². Pokrycia przedstawiono na rys. 4.

3.5. Liczba pomiarów

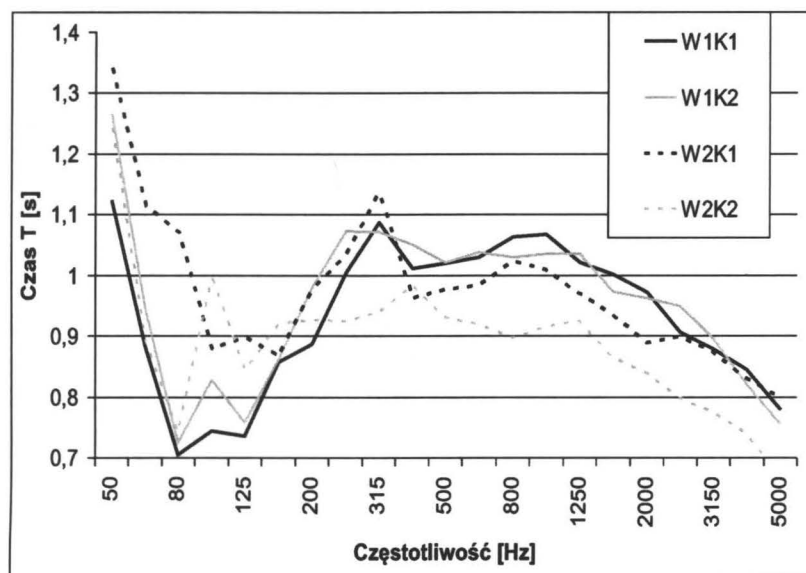
Dla każdego wariantu W1 (bez pokryć) i W2 (z pokryciami) ustawiono kulę głośnikową najpierw w położeniu K1, a następnie K2 (rys. 5). Przy tych ustawieniach wykonano sześć kolejnych pomiarów zaniku dźwięku w pomieszczeniu dla każdego z punktów pomiarowych P1-P6 (rys. 5).

3.6. Uwagi dotyczące wcześniejszych doświadczeń badawczych

Podobne badania przeprowadzono w wybranych kościołach Pętli Gliwickiej Szlaku Architektury Drewnianej województwa śląskiego i na Opolszczyźnie. Obiekty te różniły się od kościoła w Szalszy zarówno cechami geometrycznymi (kształtem i wielkością) jak i materiałowymi. Przebadane kościoły położone na terenie Pętli Gliwickiej Szlaku Architektury Drewnianej województwa śląskiego: św. Jerzego w Ostropie i Wszystkich Świętych w Sierotach, mają prezbiteria murowane, a nawy nie mają zaskrzynień. Ponadto w Ostropie są posadzki kamienne i nie ma ławek [9 i 10]. Istniejące różnice utrudniają bezpośrednie porównanie obiektów.

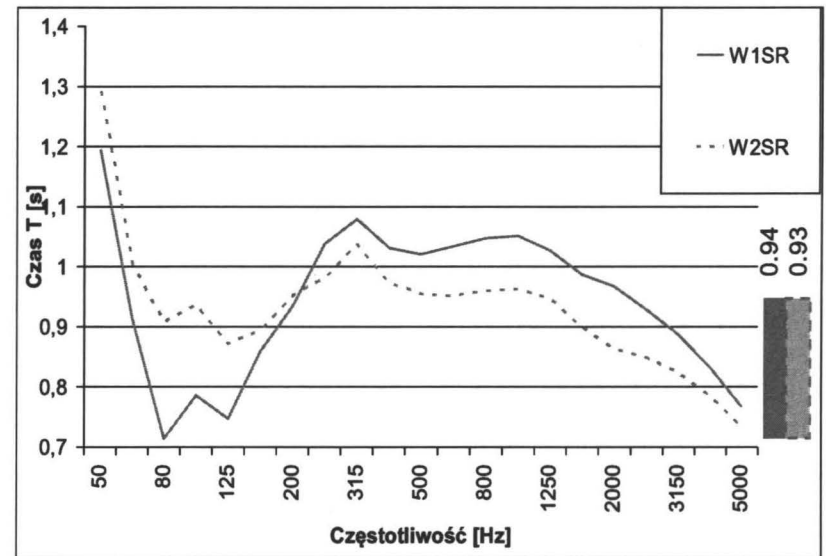
4. WYNIKI POMIARÓW I OBLICZEŃ

Wyniki przeprowadzonych pomiarów oraz obliczeń zestawiono poniżej w formie wykresów oraz tabeli.



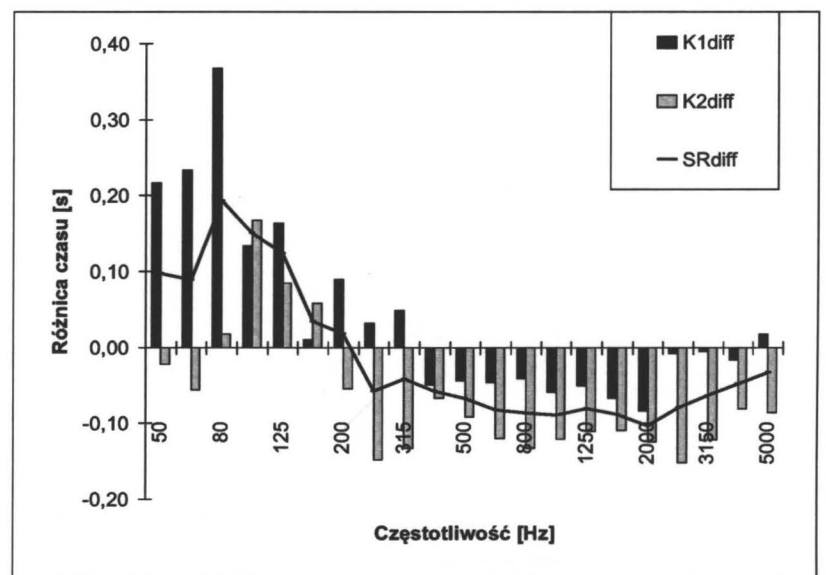
Rys. 6. Czasy pogłosu w funkcji częstotliwości dla obu sytuacji pomiarowych dla każdego z dwu ustawień kuli głośnikowej
Fig. 6. Frequency characteristics of the reverberation times for both measurement situations for each sound source locations

Na rys. 6 zestawiono uśrednione przebiegi czasów pogłosu w funkcji częstotliwości, odpowiednio dla wariantu: W1K1 i W1K2 (bez pokryć) i W2K1 oraz W2K2 (z pokryciami) obliczone jako średnie z pomiarów (dla każdego z wariantów).

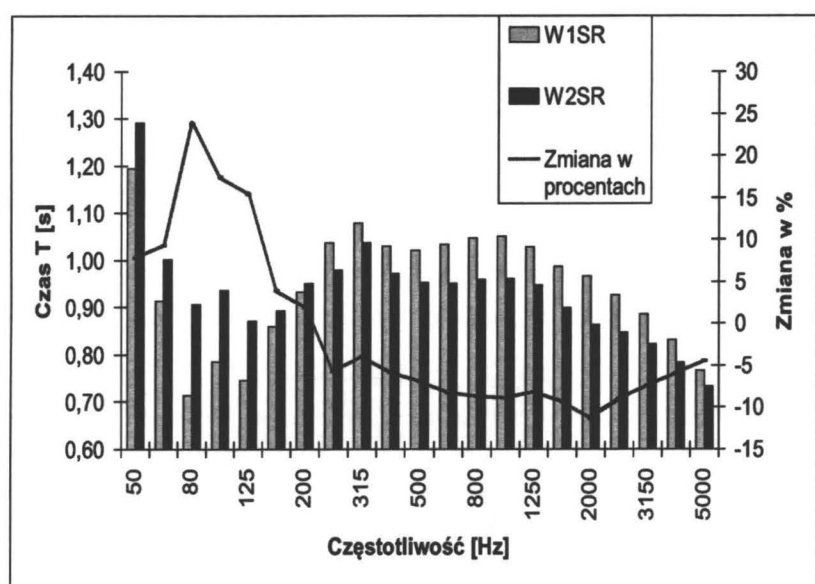


Rys. 7. Uśrednione czasy pogłosu w funkcji częstotliwości dla obu sytuacji pomiarowych
Fig. 7. Average frequency characteristics of the reverberation times for both measurement situations

Na rys. 7 zestawiono przebiegi czasów pogłosu w funkcji częstotliwości, odpowiednio dla wariantu: W1 (bez pokryć) i W2 (z pokryciami) obliczone jako średnie z pomiarów przy ustawieniu kuli głośnikowej K1 i K2 (dla każdego z wariantów).



Rys. 8. Zmiany czasu pogłosu w funkcji częstotliwości dla pierwszego, drugiego i średniej z dwu powyższych umiejscowienia kuli głośnikowej
Fig. 8. Changes of the reverberation times as a frequency function for first, second and average for both of these sound source location



Rys. 9. Uśrednione wartości czasów pogłosów w funkcji częstotliwości dla obu sytuacji pomiarowych wraz z procentową zmianą pomiędzy tymi sytuacjami

Fig. 9. Average values of the reverberation times as a frequency functions for both measurement situations and percentage change between measurement situations

Tabela 1. Wybrane parametry oceny jakości akustycznej dla obu sytuacji pomiarowych (W1 oraz W2)

Table 1. Some acoustic quality evaluation parameters for both (W1 and W2) measurement situations

Wybrane parametry oceny akustycznej wnętrza		Częstotliwość [Hz]					
Symbol	Jednostka	125	250	500	1000	2000	4000
W1 STI	-	-	-	0,64	-	0,66	-
W2 STI	-	-	-	0,66	-	0,68	-
W1 D ₅₀	-	0,60	0,49	0,49	0,48	0,51	0,56
W2 D ₅₀	-	0,55	0,51	0,52	0,51	0,55	0,59
W1 C ₈₀	[dB]	5,30	2,78	2,90	2,69	3,29	4,42
W2 C ₈₀	[dB]	4,07	3,19	3,40	3,33	4,14	4,90
W1 BR	-	0,86					
W2 BR	-	0,97					
W1 TR	-	0,87					
W2 TR	-	0,86					
STI – wskaźnik transmisji mowy D ₅₀ – wskaźnik klarowności mowy C ₈₀ – współczynnik klarowności muzyki BR – stosunek basów TR – stosunek trebli							

Na rys. 8 zestawiono zmiany czasów pogłosu po zastosowaniu pokryć ław kościelnych odpowiednio dla pierwszego (*K1diff*), drugiego (*K2diff*) ustawienia kuli głośnikowej oraz dla wyników uśrednionych z obu ustawień (*SRdiff*).

Na rys. 9 pokazano procentową zmianę wartości czasu pogłosu w funkcji częstotliwości w zestawieniu z uśrednionymi czasami pogłosów przed (*W1SR*) i po (*W2SR*) dodaniu pokryć ław kościelnych.

W tabeli 1 zestawiono wybrane parametry oceny jakości akustycznej rozpatrywanego wnętrza dla wariantów: W1 (bez pokryć) i W2 (z pokryciami).

Wskaźnik transmisji mowy *STI* przyjęto jako przybliżenie funkcji logarymicznej o postaci $-A \cdot \ln T + B$, gdzie zarówno postać równania jak i wartości współczynników oparto na [11]. Wskaźniki *D₅₀*, *C₈₀*, *BR* oraz *TR* opracowano w oparciu o wytyczne zawarte [12].

5. PODSUMOWANIE

Uzyskane przebiegi częstotliwościowe czasów pogłosu w prowadzonych badaniach okazały się podobne dla pierwszego oraz drugiego ustawienia kuli głośnikowej w przypadku bez pokryć ław. Natomiast zanotowano rozbieżności w charakterystykach częstotliwościowych dla kolejnych ustawień źródła dźwięku w przypadku zastosowania miękkich pokryć ław (rys. 6). Wpływ pokryć ław kościelnych na uzyskany średni czas pogłosu jest niewielki (rys.7). Dla sytuacji bez pokryć ław uzyskano średni czas pogłosu równy 0,94 s. Po założeniu pokryć uległ on minimalnemu skróceniu do wartości równej 0,93 s. Stanowi to różnicę około 1% pomiędzy uzyskanymi wynikami. Szacunkowy średni współczynnik pochłaniania dla wnętrza obliczony na podstawie wzoru Sabina przyjmuje wartość około 0,17. Stosunkowo duża chłonność wnętrza powoduje, iż dodanie niewielkiej powierzchni (około 12 m²) dodatkowego materiału pochłaniającego o niewielkiej grubości nie wpływa na uzyskany średni czas pogłosu. Uzyskane czasy pogłosu mogą być powiązane również z cechami geometrycznymi i materiałowymi ław w rozpatrywanym wnętrzu [13]. Stanowi to jednak materiał wymagający osobnego opracowania badawczego. Należy również zauważyć, iż zwykle wydarzenia dźwiękowe w tego typu wnętrzach odbywają się przy przynajmniej częściowo wypełnionej „widowni”. Wypełnienie ław kościelnych słuchaczami ma zauważalny wpływ na parametry pogłosowe wnętrza [14]. Jednocześnie rodzi to problem wykorzystania zasłoniętej powierzchni pokryć.

W zakresie częstotliwości niskich, po dodaniu pokryć ław, czas pogłosu uległ wydłużeniu zwłaszcza w przypadku drugiego ustawienia kuli głośnikowej. Natomiast po przekroczeniu progu częstotliwości około 200 – 250 Hz w zasadzie dla całego pozostałego zakresu częstotliwości czasy pogłosu uległy skróceniu (rys.7). Największe

zróznicowanie uzyskanych wartości czasu pogłosu zanotowano dla częstotliwości niskich. Maksymalną wartość zmiany uzyskano dla częstotliwości 80 Hz (około 0,35 s – rys. 8). Stanowi to dla powyższej częstotliwości zmianę o około 25% (rys. 9). Obniżenia wartości czasu pogłosu dla średnich i wysokich częstotliwości osiągają wartości do około 0,1 s. W dalszej kolejności rozważono jak zanotowane różnice w uzyskanych czasach pogłosu wpłynęły na parametry oceny jakości akustycznej wnętrza. Wybrane parametry zestawiono w tabeli 1. Parametry te są zależne od czasów pogłosu stąd uzyskane wyniki podążają za zmianami rozkładów czasu pogłosu w funkcji częstotliwości.

Przeprowadzone badania wykazały, że miękkie pokrycia siedzisk ław kościelnych (wykonane z gąbki i materiału), nie mają istotnego wpływu na zmianę średniego czasu pogłosu w wnętrzu drewnianego kościoła o niewielkich gabarytach. Ten tani i dyskretny sposób wprowadzenia do wnętrza zabytkowego materiałów o większej chłonności niż drewno ławek, niestety, nie skraca w sposób istotny czasu pogłosu we wnętrzu.

INFLUENCE OF SOFT COVERING FOR CHURCH BENCHES ON REVERBERATION CHARACTERISTICS FOR INTERIOR OF THE MONUMENTAL WOODEN CHURCH

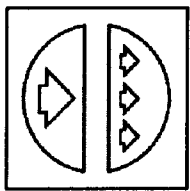
Summary: This paper presents evaluation of the possibilities of using soft bench covers to changing reverberation characteristics in interior of historic wooden church of Blessed Virgin Mary's placed in Szalsza. Tarnowskie Góry County. Paper contains measurements of the reverberation times for interior of the church. Measurements were done for two cases – allow for soft covers for pews and without covers. Based on measurements of reverberation times, were determined some parameters of acoustic quality evaluation for interiors (STI, D₅₀, C₈₀, bass and treble ratio).

Literatura

- [1] Kloss E., Rode H., Stepf W., Eberle H. Die Bau- und Kunstdenkmäler des Kreises Tost-Gleiwitz, w serii: Die Bau- und Kunstdenkmäler Schlesiens, t. 5. Regierungsbezirk Kattowitz, W. G. Korn Verlag, Breslau 1943.
- [2] Łabuz M. i S. Kościół pod wezwaniem Matki Boskiej (Karta Ewidencji Zabytków Nieruchomych, tzw. Biała Karta - Archiwum Śląskiego Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków w Katowicach), 1997, s. 2.
- [3] Żaba A. (red.). Projekt Szalsza_2015: Kościół pw. Narodzenia Najświętszej Marii Panny w Szalszy. Opracowanie studentów specjalności S1_R_CKI_BA, Gliwice: Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach 2015, (opracowanie niepublikowane).

- [4] PN-ISO 9836:2015-12: Właściwości użytkowe w budownictwie - Określanie i obliczanie wskaźników powierzchniowych i kubaturowych.
- [5] Mahdavi A., Gurtekin B. *Shapes, Numbers, and Perception: Aspects and Dimensions of the Design Performance Space*. W: Proceedings of the 6th International Conference: Design and Decision Support Systems in Architecture. Netherlands, 2002, ss. 291–300.
- [6] Koźniewski E., Żaba A., Dudzik P. *The Compactness Indicators of Solids*. W: Proceedings of 22nd Conference Geometry Graphics Computer, Kraków: Politechnika Śląska. Ośrodek Geometrii i Grafiki Inżynierskiej, 2015, ss. 48–55.
- [7] PN-EN ISO 3382-1:2009 – Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 1: Pomieszczenia specjalne.
- [8] PN-EN ISO 3382-2:2010 – Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach.
- [9] Marchacz M., Dulak L. *Badania akustyczne wnętrza zabytkowego kościoła pw. Wszystkich Świętych w Sierotach*. JCEEA. t. XXXI. z. 61 (3/II/14) lipiec wrzesień 2014, ss. 339-346.
- [10] Marchacz M., Żaba A. *Pilotażowe badania akustyczne zabytkowych kościołów drewnianych na terenie Górnego Śląska*. JCEEA. t. XXXIII. z. 63 (3/16) lipiec wrzesień 2016, ss. 255-262.
- [11] Nowoświat A. *Model logarytmiczny wyznaczania wskaźnika zrozumiałości mowy*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, tom 2 (2007) 215-218.
- [12] Rossing T. Springer Handbook of Acoustics. 2007.
- [13] Martellotta F., Cirillo E. *Experimental studies of sound absorption by church pews*. Applied Acoustics March 2009, ss. 441-449.
- [14] Martellotta F., D'alba M., Others. *Laboratory measurement of sound absorption of occupied pew and standing audiences*. Applied Acoustics. Maj 2011, ss. 341-349.

Pracę zrealizowano w Politechnice Śląskiej w ramach BK – 245/RB-3/2016



WPLYW PROJEKTOWANEJ ZABUDOWY NA WARUNKI WIATROWE OTOCZENIA NA PRZYKŁADZIE INWESTYCJI PRZY UL. POWĄŻKOWSKIEJ W WARSZAWIE

M. POĆWIERZ*, K. GUMOWSKI, K. JÓŹWIAK, J. PIECHNA

Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej

ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa, email: mpocwie@meil.pw.edu.pl, kgumowski@meil.pw.edu.pl, rjozwiak@meil.pw.edu.pl, jpie@meil.pw.edu.pl

Streszczenie: Publikacja przedstawia wyniki badań aerodynamicznych osiedla zlokalizowanego przy ul. Powązkowskiej w Warszawie. Badania miały dać odpowiedź na pytanie – czy i w jakim stopniu projektowana na tym terenie zabudowa wpłynie na pogorszenie warunków swobodnego przepływu powietrza i jego napływu w dalsze rejony Warszawy, zmieniając w ten sposób układ istniejącej naturalnej wentylacji miasta oraz jak ukształtują się warunki wiatrowe na terenie planowanej zabudowy i w najbliższym jej otoczeniu. Badania eksperymentalne przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym z odwzorowaną warstwą przyziemną dla ośmiu podstawowych kierunków wiatru. Odpowiedni profil prędkości i intensywności turbulencji otrzymano przez wprowadzenie do tunelu elementów zaburzających przepływ w postaci iglic i klocków, usytuowanych przed wymodelowaną zabudową analizowanego terenu. Badania eksperymentalne w tunelu aerodynamicznym przeprowadzono dwoma komplementarnymi metodami polowymi: wizualizacji olejowej i saltacji piasku. W celach porównawczych przeprowadzono również obliczenia numeryczne. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano barwne mapy obrazujące strefy o zróżnicowanych prędkościach przepływu, a więc o różnym komforcie wiatrowym oraz obrazy z dobrze zarysowanymi strefami wirowymi i z obszarami zastoju powietrza.

Słowa kluczowe: Komfort wiatrowy, metody polowe, strefy wirowe, strefy zastoju

1. WSTĘP

Niniejszy artykuł dotyczy jednego z problemów, którymi zajmuje się inżynieria wiatrowa – komfortu wiatrowego mieszkańców, szeroko opisanego w [1, 2, 3, 4, 5].

Władze miast, inwestorzy, a przede wszystkim my wszyscy – użytkownicy przestrzeni miejskiej, zaczęliśmy zauważać problem, jakim są uboczne skutki działania wiatru.

W niektórych przypadkach konieczność wykonania ekspertyzy aerodynamicznej nowo budowanego lub rozbudowanego osiedla podyktowana jest prawnie. Taka sytuacja ma miejsce w przypadku, gdy lokalizacja planowanej inwestycji znajduje się w obszarze tzw. klinów napowietrzających [6, 7]. Zdarza się też czasami, że inwestor zleca takie badania w celu podniesienia atrakcyjności oferowanych osiedli.

Celem przeprowadzania takich analiz jest między innymi:

- Zminimalizowanie liczby stref stagnacji, tj. obszarów nieprzewietrzanych, w których zbierają się różne zanieczyszczenia i uciążliwe zapachy.
- Zmniejszenie prędkości uciążliwych podmuchów wiatru, które są szkodliwe dla zdrowia.
- Odpowiednie rozlokowanie okien, drzwi, bram, prześwitów w budynkach i otworów wentylacyjnych.
- Przewidzenie efektów akustycznych spowodowanych drganiami elementów, związanych z przepływem strug powietrza przez różne szczeliny.

Publikacja obejmuje eksperymentalną i numeryczną część badań nad komfortem wiatrowym osiedla usytuowanego przy ul. Powązkowskiej w Warszawie. Określono szczegółowe warunki związane z przepływami, penetracją strumieni powietrza, lokalizujące strefy oderwań i strefy zastoju powietrza. Sformułowano szczegółowe wnioski dotyczące lokalnych warunków przewietrzania i komfortu mieszkańców terenów objętych oddziaływaniem tej zabudowy w skali lokalnej. Obliczono też straty energii wiatru wygenerowane przez budynki osiedla i określono ich wpływ na przewietrzalność i komfort mieszkańców w dalszych rejonach Warszawy.

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

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE W TUNELU AERODYNAMICZNYM

2.1. Warunki badań eksperymentalnych

Badania osiedla przy ul. Powązkowskiej w Warszawie przeprowadzono w przelotowym tunelu z zamkniętą przestrzenią pomiarową o wymiarach 1x1m, znajdującym się w Laboratorium Aerodynamiki Instytutu Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej.

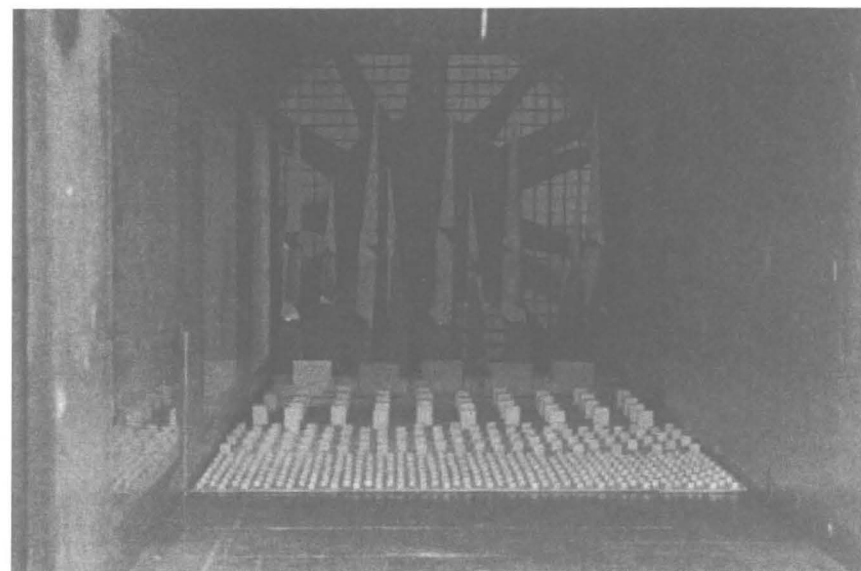
Ze względu na wzajemne oddziaływania przepływowe, plan przestrzennej zabudowy planowanego osiedla (kolor zielony) z istniejącą już na okolicznym terenie zabudową (kolor granatowy) oraz z zadrzewionym terenem o promieniu 500m wykonano w skali 1:1000 (Rys. 1).



Rys. 1. Model zabudowy
Fig. 1. Model of building

W celu uzyskania jak największej dokładności i wiarygodności badań szczególną uwagę poświęcono dokładnemu odwzorowaniu rzeczywistej struktury warstwy przyziemnej w tunelu aerodynamicznym [8, 9].

Strukturę wiatru w warstwie przyziemnej, w strefie lokalizacji planowanej zabudowy, odwzorowano modelując odpowiednio profil średniej prędkości wiatru i rozkład intensywności turbulencji według normy PN-EN 1991-1-4:2008 [8].



Rys. 2. Elementy kształtujące profil średniej prędkości i intensywności turbulencji.

Fig. 2 Elements shaping the profile of mean velocity and the intensity of turbulence.

Warstwę przyścienną w tunelu aerodynamicznym, w miejscu usytuowania rozpatrywanego modelu zabudowanego terenu uzyskano przeliczając zależności dla warstwy przyziemnej na skalę modelu, co umożliwia poprawne odwzorowanie warunków rzeczywistych.

Pożądany profil prędkości w warstwie przyścienniej w tunelu aerodynamicznym uzyskano korzystając z zależności:

$$V/V_{10} = (z/10)^{0.24} \quad (1)$$

Natomiast pożądany poziom intensywności turbulencji obliczono na podstawie wzoru:

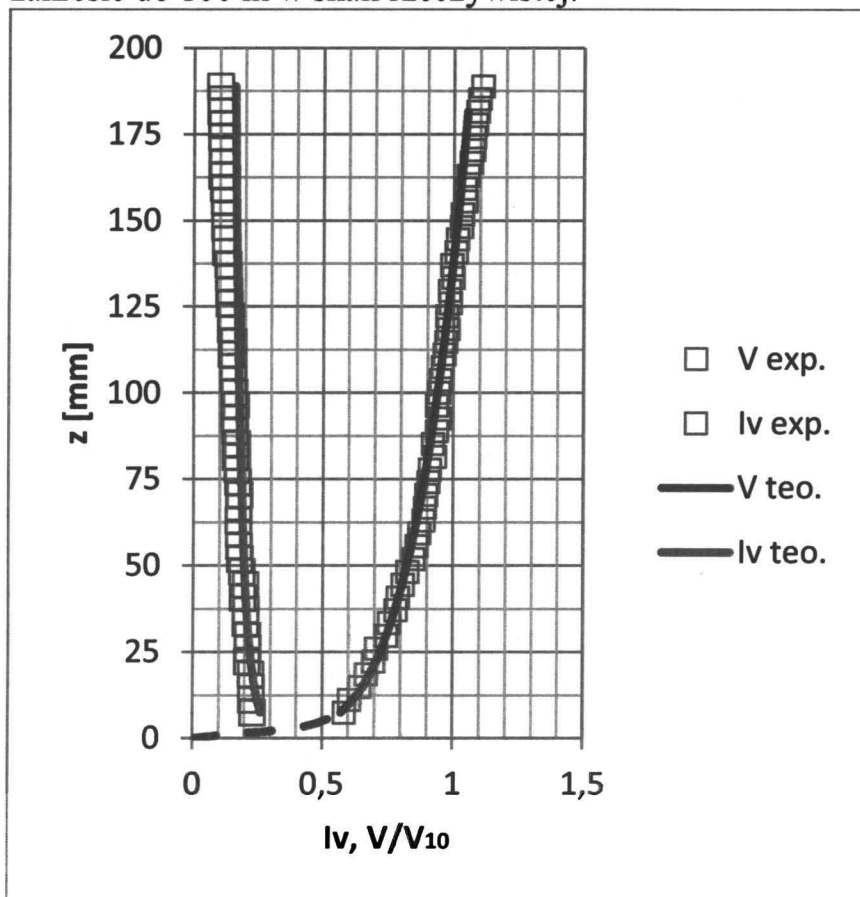
$$I_v(z) = \frac{1}{\ln(z/z_0)} \quad (2)$$

Dla odwzorowania warstwy przyziemnej w tunelu zostały zainstalowane elementy zaburzające i nadające chropowatość w postaci iglic i klocków (Rys. 2), umieszczonych przed badanym terenem z wymodelowaną jego zabudową. Ich geometria i rozmieszczenie w tunelu ustalane są każdorazowo dla konkretnego przypadku terenu.

Pożądane profile prędkości i intensywności turbulencji (według [8]) w warstwie przyścienniej nad podłogą w tunelu aerodynamicznym przedstawiono na Rys. 3. Na tym samym rysunku naniesiono również wyniki pomiarów przeprowadzonych w wymodelowanej warstwie przyścienniej w postaci punktów.

Na podstawie Rys. 3 można stwierdzić, że uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników pomiarów profili intensywności turbulencji oraz średniej prędkości przepływu w warstwie przyścienniej w tunelu aerodynamicznym z pożądanymi

charakterystykami, a szczególnie w najbardziej pożądanym zakresie do 100 m w skali rzeczywistej.



Rys. 3. Profile bezwymiarowej średniej prędkości wiatru oraz intensywności turbulencji.

Fig. 3. Profiles of the dimensionless mean wind velocity and turbulence intensity

2.2. Metody polowe – wizualizacji i saltacji piasku

Badania przeprowadzono dwoma wzajemnie uzupełniającymi się metodami – wizualizacji olejowej i saltacji piasku, szeroko opisanymi w [1].

Metoda wizualizacji umożliwia poznanie struktury przepływów w warstwie przyziemnej, ich linii prądu i penetracji strumieni powietrza na zabudowanym terenie. Charakterystyczną cechą tej metody jest to, że lepki olej ze względu na swoją bezwładność odwzorowuje główny nurt strumienia o dużej energii i nie poddaje się pobocznym ruchom w przepływie o znacznie mniejszej energii, które są wynikiem sturbulizowanego przepływu.

Do wizualizacji nazywanej „olejową” stosowana jest mieszanka oleju z bielą tytanową. Mieszkanką tą pokrywa się obrotową podłogę, która jest wykonana z czarnego szkła dla uzyskania lepszych kontrastowych efektów na zdjęciach. Przy dużej intensywności przepływu olej zdmuchiwany jest z podłogi i odsłania się czarna podłoga. Natomiast przy bardzo małej intensywności przepływu tworzą się strefy zastoju, w których gromadzi się mieszanka olejowa i stąd strefy te mają kolor intensywnej bieli. Przy pośrednich warunkach przepływowych na obrazach pojawiają się więc różne odcienie i bieli i czerni.

Wizualizacja przepływów metodą saltacji piasku jest bardziej wrażliwa na lokalne małe zakłócenia w przepływie. Wizualizacja ta umożliwia uzyskanie kolorowych obrazów stref z konturami o stałych prędkościach przepływu powietrza na badanym terenie, co w bardzo plastyczny sposób identyfikuje i uwidacznia strefy o zróżnicowanej intensywności przewietrzania terenu i lokalnego komfortu wiatrowego.

Pomiar odbywa się dwuetapowo zgodnie z opisem w [1]. W pierwszym z nich (etapie kalibracji) pusta szklana płyta o chropowatej powierzchni posypywana jest równomiernie wysuszonym piaskiem o znormalizowanej wielkości ziaren. Płyta zostaje umieszczona w tunelu aerodynamicznym. Prędkość w tunelu zostaje stopniowo zwiększana aż do momentu, w którym zaczyna się proces saltacji i prawie cały piasek zostanie wywiany. Zmierzona wtedy wielkość prędkości jest proporcjonalna do prędkości przy ziemi, z którą wiatr w rzeczywistości oddziałuje na piasek. W kolejnym etapie do wyczyszczonej płyty przytwierdzone są budynki i kolejny raz nanoszona jest warstwa piasku. Prędkość przepływu zwiększana jest skokowo. Przed każdą zmianą pozostawiany jest czas do ustalenia się kształtu strefy wywianego piasku. W pobliżu budynków może dojść do przyspieszenia przepływu i tam, gdzie prędkość przekroczy wartość wyznaczoną w etapie kalibracji dochodzi do wywiania piasku.

2.3. Przykładowe wyniki badań metodą wizualizacji olejowej

Wizualizacja olejowa zjawisk przepływowych w warstwie przyziemnej dla analizowanego terenu bez i z planowaną zabudową została przeprowadzona dla ośmiu kierunków wiatru. Przykładowe wyniki z badania wykonanego tą metodą dla północnego kierunku wiatru prezentowane są na Rys. 4.

Na obrazie z wizualizacji terenu bez zabudowy (Rys. 4a) dominuje kolor biały. Kolor intensywnej i przytłumionej czerni obejmuje znacznie mniejsze obszary. Można zatem stwierdzić, że na rozpatrywanym terenie dominują przepływy o małej intensywności lub wręcz obszary zastoju powietrza. Obszary te pojawiają się głównie w środkowym pasie terenu w pewnej odległości za grupą zabudowań znajdujących się w górnej strefie obrazu i w miarę oddalania się od tych zabudowań nabierają coraz intensywniejszej bieli. Dodatkowym czynnikiem, spowalniającym przepływ na tym obszarze jest duży zadrzewiony teren (cmentarz komunalny), który dodatkowo wyhamowuje przepływ wiatru.



a) bez planowanej zabudowy



b) z planowaną zabudową

Rys. 4. Wizualizacja olejowa – wiatr północny
Fig. 4. Oil visualization – north wind

Taki przebieg zjawisk skutkuje tym, że na terenie zadrzewionym widoczne są duże obszary zastoju.

Obszary o dużej intensywności przepływów widoczne są natomiast w cieniu zabudowań, które generują silną turbulencję poprawiając tym samym przewietrzalność tych obszarów.

Bezpośrednio za wspomnianą grupą zabudowań widoczne są obszary o głębokiej czerni, świadczące o strefach oderwania przepływów lub mniejsze obszary o intensywniejszej bieli, wskazujące strefy zastoju powietrza.

Na podstawie prezentowanego zdjęcia i przeprowadzonej analizy zjawisk przepływowych można stwierdzić, że dla północnego kierunku wiatru teren niezabudowany, przewidywany na planowaną inwestycję, charakteryzuje się słabą przewietrzalnością i niskim komfortem wiatrowym. Analizując obraz na Rys. 4b można zauważyć, że dużo mniej jest obszarów o intensywniej bieli reprezentujących strefy zastoju. Wokół budynków zmniejszyły się radykalnie zarówno strefy czarne jak i białe. Strefy o silnej bieli znajdujące się w okolicach miejsc zadrzewionych przybladły. Wewnątrz planowanej zabudowy możemy zauważyć tylko niewielkie i słabe strefy zastoju. Wprowadzenie budynków spowodowało mocniejsze sturbulizowanie przepływu w terenie i tym samym lepszą penetrację powietrza w osiedlu.

Analizy obrazów z wizualizacji olejowej dla pozostałych badanych 7 kierunków wiatru pozwalają wyciągnąć podobne wnioski. Można na ich podstawie stwierdzić, że wprowadzenie planowanej zabudowy na rozważany teren nie powoduje pogorszenia, ale wręcz poprawę warunków wiatrowych na terenie istniejącej zabudowy. Zapewnia swobodną penetrację powietrza w głąb istniejącego osiedla.

2.4. Przykładowe wyniki badań metodą saltacji piasku

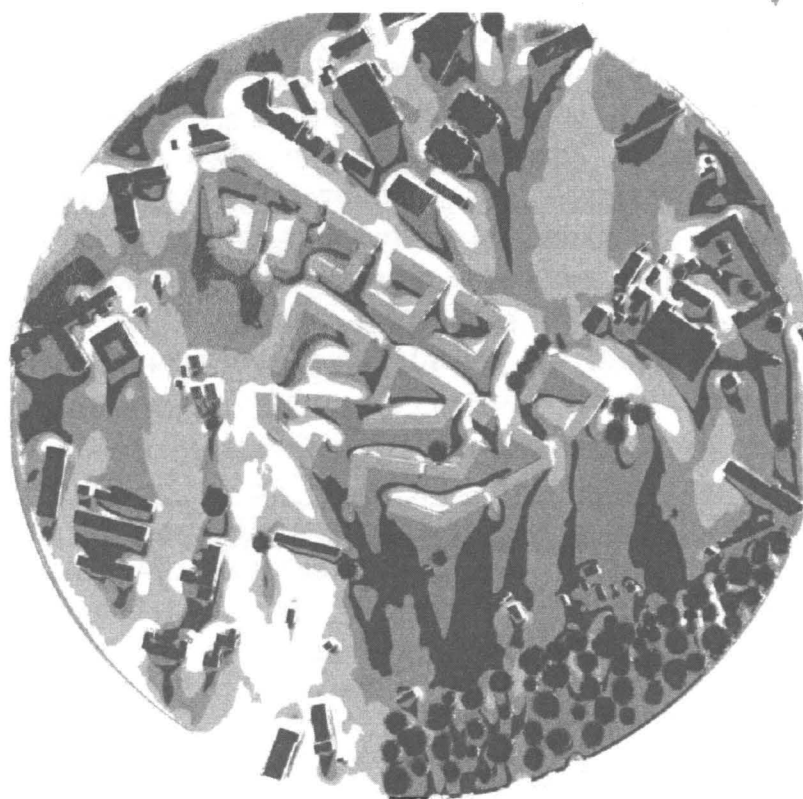
Wyniki z wizualizacji zjawisk przepływowych metodą saltacji piasku w warstwie przyziemnej dla terenu bez planowanej zabudowy i z planowaną zabudową dla północnego kierunku wiatru przedstawione zostały na Rys. 5.

W metodzie saltacji piasku kolorem białym zaznaczone zostały strefy o najsilniejszym przewietrzaniu, które przy większej sile wiatru mogą być trochę uciążliwe.

Kolorem żółtym zaznaczone są natomiast strefy o nieco mniejszej intensywności przewietrzania, które przy średniej sile wiatru stwarzają komfortowe warunki dla mieszkańców, a przy bardzo silnych wiatrach nie są już tak uciążliwe jak strefy białe.



a) bez planowanej zabudowy



b) z planowaną zabudową

Rys. 5. Wizualizacja metodą saltacji piasku – izolinie stałych prędkości, wiatr północny

Fig. 5. Sand erosion method – isolines of constant speed, north wind

■ Kolorem pomarańczowym zaznaczono obszary o dobrej wentylacji zarówno przy małych jak i przy dużych prędkościach wiatru.

■ Kolorem czerwonym zaznaczono obszary o nieco zmniejszonej przewietrzalności, które przy normalnych

warunkach wiatrowych wskazują na strefy ze stosunkowo słabym przewietrzaniem, a przy silnych wiatrach przewietrzanie stosunkowo dobre.

■ Kolorem szarym zaznaczone są natomiast strefy o słabej recyrkulacji i strefy zastoju.

Na podstawie analizy uzyskanych obrazów, przeprowadzonej przy północnym kierunku wiatru, zaprezentowanych na Rys. 5a i 5b, można sformułować pewne oceny dotyczące skutków, jakie spowoduje wprowadzenie planowanej zabudowy na rozpatrywany teren: w strefie istniejących już na tym terenie budynków, znajdujących się przed planowaną zabudową, oznaczonych liczbą 1, nie obserwuje się istotnych różnic; w strefie budynku 2 odnotować można wyraźną poprawę warunków wiatrowych; w strefie całej grupy 12 budynków oznaczonych liczbą 3 zanotowano znaczną poprawę warunków wiatrowych; w strefie grupy budynków 4 i 5, znajdujących się poniżej za planowaną inwestycją nastąpiła duża poprawa komfortu wiatrowego – zostały wyraźnie zredukowane, a w niektórych miejscach całkowicie zlikwidowane strefy zastoju; w rejonie budynków 6 i 7 nastąpiła poprawa komfortu wiatrowego, za całym planowanym osiedlem; w strefie 8 nastąpiło pogorszenie komfortu wiatrowego (duży zadrzewiony obszar spowodował wyhamowanie przepływu). Podsumowując, na całym planowanym osiedlu odnotowywany jest dobry komfort wiatrowy zarówno przy małych jak i większych prędkościach.

Wyniki przeprowadzonych badań upoważniają do stwierdzenia, że planowana inwestycja spowoduje poprawę warunków wiatrowych na sąsiadującym terenie.

Podobne wnioski można wyciągnąć analizując komfort wiatrowy przy pozostałych kierunkach wiatru.

3. SYMULACJE KOMPUTEROWE

3.1. Obliczenia dotyczące komfortu wiatrowego

W przypadku symulacji numerycznych istnieje możliwość zadania na odpowiednim brzegu obszaru obliczeniowego żadanego profilu prędkości średniej i turbulencji. Przyjęto w tym przypadku, iż obszar obliczeniowy ma formę walca. Ze względu na skomplikowaną geometrię analizowanego osiedla i wymagania, co do wymiaru siatki przyjęcie takiej geometrii w znaczący sposób skróciło obliczenia bez utraty ich dokładności.

W przedstawianym przypadku wysokości budynków osiedla sięgają 28 m, co daje minimalną wartość wysokości obszaru obliczeniowego około 150 m. Do obliczeń przyjęto wysokość 200 m.

Ostatecznie obszar obliczeniowy ma średnicę 1000 m i wysokość 200 m. Zastosowana siatka ma zróżnicowane wymiary. Została znacząco zagęszczona w obszarach tuż przy budynkach, a także w obszarach, w których budynki

sąsiadują ze sobą. Powierzchnie budynków pokryto siatką elementów czworosiecznych o boku 0.5 m. Siatka ulegała rozrzedzeniu w miarę oddalania się od budynków.

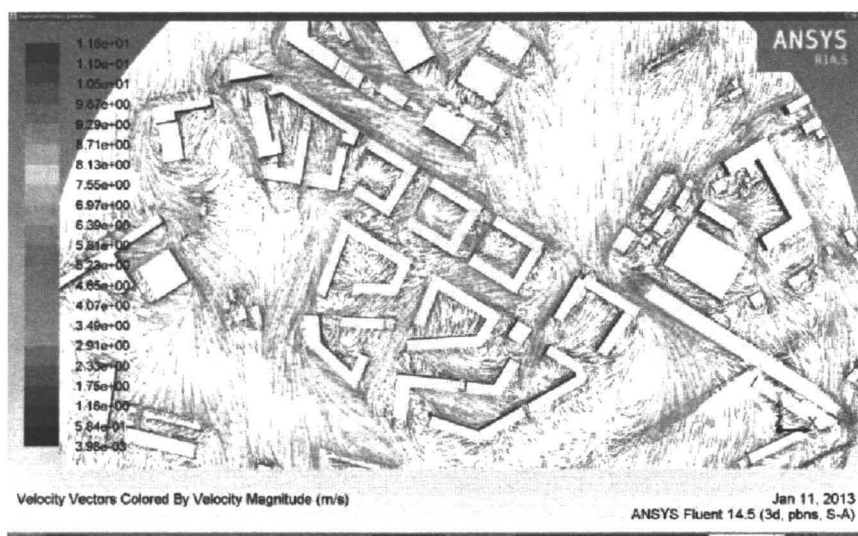
Ze względu na silne i dobrze zdefiniowane linie oderwania przepływu przyjęto, iż w tym wypadku najskuteczniejszym modelem turbulencji będzie model Spalarta-Allmarasa, mogący pracować przy rzadszej siatce w pobliżu ziemi.

W przeprowadzonej symulacji przyjęto profil prędkości wg zależności podanej we wzorze (1) i intensywności turbulencji zdefiniowanej przez (2). Wielkość z_0 była równa 0.05 m, jak dla terenu klasy II-giej.

Dla części wylotowej obszaru ustawiono warunek stałego ciśnienia. Na górnej powierzchni analizowanego obszaru leżącej 200 metrów nad powierzchnią ziemi przyjęto warunek ruchomej powierzchni poruszającej się z prędkością wiatru na tej wysokości.

Na powierzchni ziemi i budynków przyjęto warunek zerowych prędkości powietrza.

Dla oszacowania warunków przewietrzania osiedla wykonano wizualizacje naprężeń stycznych na ziemi w obszarze osiedla i rozkładów wektorów prędkości przepływu powietrza na wysokości 1.5 m nad ziemią. Wizualizacje wykonano dla czterech głównych kierunków wiatru. Przykładowy rozkład wektorów prędkości powietrza na wysokości 1.5 m nad ziemią dla wiatru z północy (N) przedstawiony jest na Rys. 6.



Rys.6. Rozkłady wektorów prędkości powietrza na wysokości 1.5 m nad ziemią – wiatr z północy (N).

Fig. 6. Distributions of velocity vectors of air at a height of 1.5 m above the ground

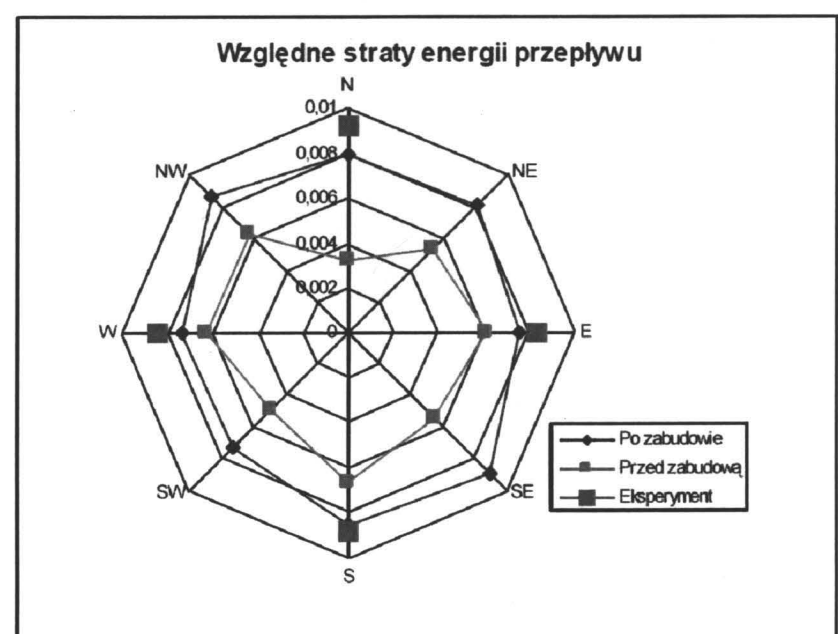
Porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań tunelowych wykazało jakościową zgodność. Porównywano obszary o zmniejszonej i podwyższonej prędkości przepływu oraz strefy zastoju.

3.2. Szacowanie strat energii wiatru

Dla oszacowania strat przepływu wywołanych oddziaływaniem zabudowy analizowanego obszaru, porównywano rozkłady ciśnienia całkowitego na powierzchniach wlotowych i wylotowych z analizowanego obszaru. Całowano wartości ciśnienia całkowitego na tych powierzchniach i obliczano różnice tych wartości. Stosunek obliczonej różnicy do wartości wlotowej definiował względne wartości strat. Uwzględniając udział energii kinetycznej w analizowanym 200 metrowym obszarze warstwy przyziemnej wynoszący 11.4 % energii w pełnej 900 metrowej warstwie przyziemnej obliczano względny spadek energii kinetycznej przepływu wywołany obecnością budynków i innych przeszkód na powierzchni ziemi. Straty energii przepływu powietrza dla obszaru przed zabudową wynoszą około 0.5-0.6% energii przepływu niezakłóconego.

Straty energii przepływu powietrza dla obszaru po zabudowie wynoszą około 0.8-0.9% energii przepływu niezakłóconego. Zabudowa analizowanego obszaru spowoduje dodatkowe straty przepływu (poza kierunkiem wiatru północnego) nieprzekraczające 0.35% energii przepływu niezakłóconego.

Na Rys. 7 przedstawiono względne straty energii przepływu w analizowanym obszarze w postaci wykresu kierunkowego. Zaznaczono na nim także wyniki badań eksperymentalnych (po zabudowie). Można zauważyć zgodność wyników eksperymentalnych i numerycznych. (Szczegółowy opis badań eksperymentalnych dotyczących szacowania strat energii wiatru wywołanych wprowadzeniem w obszar przedstawianej zabudowy zamieszczony jest w [6])



Rys. 7. Względne straty energii przepływu w zależności od kierunku wiatru i typu zabudowy

Fig. 7. The relative loss of energy flow, depending on the wind direction and the type of the building

Obliczonych strat energii wiatru nie należy traktować, jako strat trwałych, a jedynie, jako chwilowe. Zgodnie z zasadą zachowania wydatku – wydatek całego układu nie zmienia się. Strumień powietrza przy opływie budynku (lub jakiegś innej przeszkody – może to być teren zadrzewiony) zmniejsza swoją prędkość przed budynkiem mniej więcej w obszarze jego wysokości i szerokości. Zgodnie z zasadą zachowania wydatku, prędkości przepływu nad dachem i po jego bokach wzrastają w takim stopniu, aby suma pędu nie zmieniła się. Wydatek zatem całego układu nie zmienia się. Zmieniają się tylko warunki wiatrowe za budynkiem w porównaniu do tych, jakie panowały przed budynkiem. Za budynkiem, w jego obrębie odnotujemy zatem spadek prędkości przy jednoczesnym wzroście prędkości w obszarze powyżej jego dachu i po jego bokach. Taki stan rzeczy nie będzie jednak trwały. W miarę oddalania się od budynku prędkości w przekroju za budynkiem będą się odbudowywały (to znaczy wzrastały), a prędkości wiatru ponad budynkiem i po jego bokach będą się zmniejszały, prowadząc w rezultacie do takiego stanu, jaki istniał przed budynkiem. W jakiej odległości za budynkiem takie wyrównanie nastąpi zależy zarówno od wysokości, szerokości oraz od kształtu budynku i kąta jego ustawienia względem wiatru. Przy niskich i wąskich budynkach to wyrównanie prędkości może nastąpić już w odległości 1,5 szerokości budynku. W przypadku budynków niskich ślad dochodzi nawet do 4 wysokości budynku.

Ponadto, jak wiemy, energia wiatrowa jest energią odnawialną. W atmosferze występuje ciągła wymiana powietrza pomiędzy jej dolnymi i górnymi warstwami zasilając dolne warstwy atmosfery strumieniami powietrza o dużej energii z wyższych jej warstw i tworząc kominy powietrzne sięgające kilku kilometrów.

W świetle powyższych wyjaśnień uzyskany wynik można skomentować w ten sposób, że planowana zabudowa w danym czasie nie wpłynie w stopniu odczuwalnym na warunki wiatrowe na przyległym terenie, natomiast w sensie trwałym nie pogorszy przewietrzalności, ani w bliskich ani w dalekich regionach Warszawy.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W przypadku opływu budynków, których główna forma zbliżona jest do mniej lub bardziej regularnego sześciangu, oderwania przepływu następują na ostrych krawędziach budynków i praktycznie nie zależą od liczby Reynoldsa, a zatem od prędkości przepływu. W takiej sytuacji dominują siły bezwładności nad siłami lepkościowymi. Istotna jest bezwładność powietrza a mniej jego lepkość. W opływie budynków występują obszary, w których powietrze wiruje. Występują silne ruchy powietrza w kierunku pionowym. W tej sytuacji istnieje duży transport pędu i energii kinetycznej z wyższych stref warstwy przyziemnej. Deficyt pędu i energii w pobliżu ziemi jest

szybko uzupełniany z wyższych obszarów warstwy przyziemnej. W tej sytuacji obecność budynków tylko nieznacznie wpływa na wartości prędkości wiatru w okolicy osiedla.

Porównanie wyników symulacji komputerowych z wynikami badań tunelowych wykazało zgodność obliczonych i pomierzonych struktur przepływu i strat energii. Pozwala to na potwierdzenie wiarygodności uzyskanych wyników oraz uzupełnienie informacji uzyskiwanych podczas badań tunelowych o wyniki obliczeń wielkości niemożliwych lub trudno osiągalnych metodami eksperymentalnymi. Takimi wielkościami są pola prędkości, ciśnienia i naprężeń stycznych. Można także uzyskiwać przebiegi linii prądu.

Na tej podstawie wnioskować można, że:

1. Zabudowa analizowanego obszaru powoduje tylko nieznaczne spadki energii przepływu w jego otoczeniu.
2. Geometria przepływu w obszarze osiedla zapewnia jego sprawne przewietrzanie.
3. Planowana zabudowa nie będzie miała niekorzystnego wpływu na swobodny przepływ powietrza ze względu na jej lokalizację w rejonie klina napowietrzającego Warszawę i na zmianę warunków napływu wiatru w centralne rejony Warszawy oraz nie zmieni systemu istniejącej naturalnej wentylacji miasta.

THE IMPACT OF NEW BUILDINGS ON THE WIND CONDITIONS IN THE SURROUNDING AREA ON THE EXAMPLE OF THE INVESTMENT IN POWĄZKOWSKA STREET IN WARSAW

Summary: This paper presents the results of aerodynamic research of the housing estate at Powązkowska street in Warsaw. The main purpose was to answer the question if planned buildings will affect the wind conditions in the surrounding area and further regions of the city. The experiments included oil visualizations and scour techniques were conducted in the wind tunnel, where the boundary layer was properly modeled. The appropriate mean velocity profile and turbulence intensity profile were obtained by inserting obstacles into the tunnel in order to disturb the flow and achieve an appropriate roughness at the ground level. These obstacles included spires and cubic blocks were placed at the bottom of the tunnel in the formation section, in the front of the model. The research in the tunnel was carried out for eight wind directions.

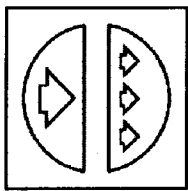
The numerical simulation of the flow around buildings was also performed using FLUENT software.

The images of flow with well-marked eddy zones and places of air stagnation and colorful maps showing the approximate distribution of velocities in the vicinity of the planned buildings were obtained.

Literatura

- [1] Blocken B., Carmeliet J. *Pedestrian wind environment around buildings: Literature review and practical*

- examples*, Journal of Thermal Envelope and Building Science 28(2) (2004) 107-159
- [2] Blocken B., Stathopoulos T., van Beeck J. *Pedestrian-level wind conditions around buildings: review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment*. Building & Environment 100 (2016) 50-81
- [3] Flaga A. *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*. Warszawa, Arkady, 2008
- [4] Janssen W.D., Blocken B., van Hoof T. *Pedestrian wind comfort around buildings: comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study*, Building and Environment 59 (2013) 547-562
- [5] Stathopoulos T. *Wind and comfort*, Firenze University Press, (2009) p. k67-k82
- [6] Józwiak R. i inni, *Ekspertyza dotycząca wpływu projektowanej zabudowy na działce 23/1 przy ul. Powązkowskiej 7/13 w Warszawie na przewietrzenie terenu i warunki wiatrowe otoczenia* (niepublikowane), Warszawa, 2013
- [7] Sierputowski P. z zespołem, *Przewietrzanie projektowanej zabudowy Centrum Olimpijskiego w Warszawie oraz efekty oddziaływania na warunki wiatrowe otoczenia*, (niepublikowane) 2002
- [8] PN-EN 1991-1-4: 2008 z załącznikiem krajowym
- [9] Gumowski K., Olszewski O., Poćwierz M., Zielonko-Jung K. *Comparative analysis of numerical and experimental studies of the airflow around the sample of urban development*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 63, No. 3, (2015) 729-737
- [10] Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T. *AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96 (2008) 1749-1761



OCENA PARAMETRÓW POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO W BUDYNKU WYŻSZEJ UCZELNI PRZED PRZEWIDYWANĄ MODERNIZACJĄ DO STANDARDU NIEMAL ZERO ENERGETYCZNEGO

Jerzy SOWA^{*}, Justyna NOGA-ZYGMUNT², Joanna UGOROWSKA³

¹ *Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Zakład Klimatyzacji i Ogrzewnictwa
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, e-mail: jerzy.sowa@is.pw.edu.pl*

² *SINAP Sp. z o.o. Poland*

³ *SIG plc, Poland,*

Streszczenie: Projekt KODnZEB ma na celu podniesienie poziomu wiedzy polskich ekspertów w dziedzinie modernizacji istniejących budynków użyteczności publicznej do standardu budynków o niemal zerowym zużyciu energii pierwotnej. Jednym z budynków analizowanych, jako studium przypadku jest gmach Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. Artykuł opisuje pomiary przeprowadzone w 32 pomieszczeniach o różnym przeznaczeniu (ok. 20% z 163 pomieszczeń, w których realizowany jest proces nauczania). Pomiary prowadzono w ciągu 10 dni w okresie wiosennym, przy zmiennych warunkach atmosferycznych (temperatura powietrza zewnętrznego zmieniała się w zakresie od 6,6 do 18,7°C). Poważne problemy z mikroklimatem zostały zidentyfikowane w pracowniach komputerowych. Ponadto analiza wykazała, że pomieszczenia położone na południowych i zachodnich elewacjach są zdecydowanie częściej przegrzewane. W salach wykładowych i audytoriach obserwowano podwyższone stężenia CO₂ sięgające 2500 ppm. Najwyższe stężenia drobnych frakcji pyłu (PM₁₀, PM_{2,5} i PM₁) zaobserwowano w pomieszczeniach laboratoryjnych oraz w magazynie bibliotecznym. Podwyższone stężenia pyłu zaobserwowano także w pomieszczeniach, w których podłogi były pokryte wykładziną dywanową oraz audytoriach, w których intensywnie wykorzystywano czarne tablice i kredę. Przeprowadzone pomiary wykazały, że koncepcja modernizacji analizowanego budynku do standardu nZEB powinna uwzględniać nie tylko technologie zmierzające do oszczędności energii, ale również przedsięwzięcia poprawiające jakość środowiska wewnątrz.

Słowa kluczowe: mikroklimat wewnątrz, budynki edukacyjne, modernizacja, nZEB

1. WPROWADZENIE

Od pewnego czasu kraje członkowskie Unii Europejskiej dążą do podniesienia efektywności energetycznej

w budownictwie. Do roku 2020 (w porównaniu do 1990 roku) planuje się redukcję o 20% emisji gazów cieplarnianych, zwiększenie efektywności energetycznej o 20% oraz osiągnięcie 20% udziału energetyki odnawialnej w bilansie energetycznym (tak zwany cel 20/20/20). Równocześnie przewiduje do 2050 r. drastyczną redukcję emisji gazów cieplarnianych w sektorze budowlanym o ok. 90% (w stosunku do roku 1990). Przyjęcie znowelizowanej dyrektywy o charakterystyce energetycznej budynków (EPBD) [1] było jednym z praktycznych sposobów realizacji tych ambitnych celów. W wyniku wdrożenia tej Dyrektywy pojawił się wymóg wznoszenia budynków o niemal zerowym zużyciu energii (od 2020r).

Projekty pilotażowe zrealizowane w wielu krajach wykazały, że możliwe jest nie tylko wznoszenie budynków o zerowym zużyciu energii, lecz nawet modernizowanie istniejących budynków do takiego standardu. Polska niestety nie ma dużych doświadczeń w tej dziedzinie. Dobrze znane technologie stosowane w trakcie programu termomodernizacji budynków są niewystarczające do tego, aby osiągnąć tak ambitne cele. Konieczny jest intensywny transfer wiedzy z krajów o znacznie bogatszych doświadczeniach. Krajem o jednych z największych doświadczeń w dziedzinie budownictwa o zerowym zużyciu energii pierwotnej jest Norwegia. Jednakże, ze względu na duże różnice pomiędzy Norwegią a Polską transfer technologiczny musi być wsparty przez szczegółowe analizy biorące pod uwagę [2]:

- istotne różnice w poziomach dochodu narodowego na głowę mieszkańca,
- wielkość polskiego rynku budowlanego i zły stan techniczny wielu istniejących budynków,

^{*}Autor korespondencyjny, e-mail: jerzy.sowa@is.pw.edu.pl

- niezbyt wysoki poziom akceptacji idei zrównoważonego rozwoju, wyrażonej przez władze i zwykłych obywateli,
- ograniczony dostęp do mechanizmów wspomagających proces budowy i zrównoważonej modernizacji budynków,
- specyfikę bilansu energetycznego Polski (bardzo silna zależność gospodarki od węgla), zwłaszcza biorąc pod uwagę, że Norwegia ma bardzo duży udział energii elektrycznej wytwarzanej przez elektrownie wodne,
- wartości współczynników nakładów energii pierwotnej dla różnych nośników energii.

Projekt KODnZEB realizowany w Politechnice Warszawskiej we współpracy z Norweskim Uniwersytetem Nauki i Technologii ma na celu podniesienie poziomu wiedzy polskich ekspertów w dziedzinie modernizacji istniejących budynków użyteczności publicznej do standardu budynków o niemal zerowym zużyciu energii pierwotnej.

2. OPIS BUDYNKU PODDANEGO BADANIU

Jednym z budynków analizowanych, jako studium przypadku w projekcie KODnZEB jest gmach Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej (WIBHIŚ). Obecnie wskaźnik zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej dla tego budynku wynosi 168 kWh/(m²rok). Projekt stawia sobie za cel opracowanie koncepcji jego modernizacji do poziomu 20 kWh/(m²rok).

Budynek został wzniesiony w latach siedemdziesiątych XX w. Bryłę budynku tworzą dwa skrzydła ustawione w kształt litery L. Skrzydło zlokalizowane wzdłuż ulicy Nowowiejskiej ma 8 kondygnacji naziemnych. Najwyższa kondygnacja pełni funkcje techniczne. Fasady tej części gmachu WIBHIŚ zorientowane są w kierunkach północnym „N” oraz południowym „S”. Skrzydło gmachu umieszczone prostopadłe do ul. Nowowiejskiej liczy 10 kondygnacji naziemnych, a najwyższa kondygnacja także pełni funkcje techniczne. Całość budynku jest podpiwniczona.

Budynek został oddany do użytku w roku 1977 i od tej pory nie przechodził gruntownego remontu z wyjątkiem wymiany okien oraz zamontowania na dachu oraz na części fasady południowej instalacji paneli fotowoltaicznych.

Całkowita powierzchnia budynku wynosi 19217 m². Wysokość kondygnacji w świetle wynosi 3,4 m. Liczbę użytkowników szacuje się na ponad 2000 osób dziennie.

W budynku znajduje się ok. 335 pomieszczeń, z czego ponad 160 pomieszczeń wykorzystywanych jest w procesie dydaktycznym. Na kondygnacjach naziemnych umieszczone są sale audytoryjne, pokoje pracowników, laboratoria oraz różnego typu pomieszczenia pomocnicze: dziekanat, sekretariaty, biblioteka, punkt gastronomiczny

z salą konsumpcyjną, sklepik papierniczy, hall z szatnią. W piwnicy znajduje się ok. 35 pomieszczeń przeznaczonych na cele techniczne, magazynowe oraz częściowo laboratoryjne.

Budynek wyposażony jest w nietypowy system wentylacji grawitacyjnej. Rolę zbiorczych kanałów wentylacyjnych pełnią pustki powietrzne zlokalizowane w przestrzeni podwójnych ścian pomiędzy korytarzami a pomieszczeniami.

Pierwotnie w salach audytoryjnych przeznaczonych dla ponad 50 studentów przewidziano instalacje wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej. Obecnie w większości te systemy nie są już użytkowane. Pomieszczenia laboratoryjne wyposażone są w różnego rodzaju systemy wentylacji wyciągowej (digestoria, okapy itp.). Instalacje te, jakkolwiek technologicznie przestarzałe, są sprawne.

Powszechna opinia na temat mikroklimatu i jakości powietrza w gmachu WIBHIŚ nie jest zbyt wysoka. Celem niniejszego badania było zobjektywizowanie ocen i określenie skali problemów w trakcie typowego użytkowania pomieszczeń. Zrezygnowano zatem z jakiegokolwiek ingerencji w działanie systemu wentylacji (we wszystkich przypadkach stare instalacje wentylacji mechanicznej były wyłączone) ani z sugerowania stosowanych technik przewietrzania pomieszczeń przed zajęciami. W zdecydowanej większości przypadków okna (pomimo braku nawiewników powietrza) pozostawały zamknięte przez cały czas pomiarów. By wyniki pomiarów nie wpływały na zachowania użytkowników do chwili ich zakończenia nie informowano zainteresowanych o zmierzonych parametrach.

Artykuł opisuje pomiary przeprowadzone w 32 pomieszczeniach o różnym przeznaczeniu (ok. 20% z 163 pomieszczeń, w których realizowany jest proces nauczania):

- sale audytoryjne - 13 pomieszczeń,
- pracownie komputerowe - 6 pomieszczeń,
- laboratoria - 5 pomieszczeń (laboratorium chemiczne, biotechnologii, technologii betonów, technologii oczyszczania ścieków, automatyki)
- pomieszczenia techniczne - 2 pomieszczenia (warsztaty wykorzystywane do pokazów)
- pomieszczenia administracyjne - 1 pomieszczenie
- inne - 5 pomieszczeń (m. in. biblioteka, magazyn biblioteczny, hall, punkt gastronomiczny).

Pomieszczenia poddane analizie zlokalizowane są na wszystkich kondygnacjach oraz na wszystkich fasadach budynku.

Badanie zrealizowano w okresie wiosennym, przy zmiennych warunkach atmosferycznych. Temperatura powietrza zewnętrznego zmieniała się w zakresie od 6,6 do 18,7°C. W trakcie cyklu pomiarowego występowały zarówno dni pochmurne z deszczem jak i dni słoneczne.

3. BADANIE PARAMETRÓW POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO

3.1. Metodyka badań

W celu oceny podstawionych parametrów mikroklimatycznych w budynku w wybranych pomieszczeniach dokonano pomiarów: temperatury powietrza, wilgotności względnej, temperatury punktu rosy, objętościowej zawartości pary wodnej w powietrzu, stężenia dwutlenku węgla, stężeń pyłu frakcji PM10, PM2,5, PM1 oraz udziału procentowego tlenu. Do pomiarów wykorzystano następujący sprzęt pomiarowy:

- Termohigrometr LB-706
Pomiar temperatury (błąd pomiaru $< 0,2^{\circ}\text{C}$)
Pomiar wilgotność względna powietrza (błąd pomiaru $< 2\%$ w zakresie 10-90% i 4% poza tym zakresem).
- Czujnik CO₂ IAQ-CLAC model 8732, Telaire
Pomiar stężenia CO₂ w zakresie 0-5000 ppm (błąd pomiaru $\pm 3\%$ odczytu lub ± 50 ppm)
- Pyłomierz Dust TRAK, TSI
Zakres pomiarowy 0,001-100 mg/m³ (kalibracja z frakcją respirabilną zgodnie z ISO 12103, A1)
- Miernik tlenu GOX-100
Zakres pomiarowy 0,100% O₂
Dokładność pomiarów $\pm 0,1\%$ O₂.

Parametry powietrza zewnętrznego (temperatura powietrza, wilgotność względna ciśnienie atmosferyczne były pobierane ze stacji meteorologicznej zlokalizowanej w Gmachu Fizyki PW (sąsiedni budynek do analizowanego).

Pomiarów dokonywano w trakcie normalnego użytkowania pomieszczeń. By nie zakłócać procesu dydaktycznego przeprowadzano je w jednym punkcie pomieszczenia na wysokości ławek i stołów laboratoryjnych. Domyślnie, punkt pomiarowy zlokalizowany był centralnie w pomieszczeniu, lecz w przypadku, gdy występowały silne nierównomierności rozmieszczenia użytkowników, sprzęt pomiarowy był umieszczany w pobliżu osób.

Pełna procedura pomiarowa dla jednego pomieszczenia trwała ok. 45 min (czas trwania 1 godziny lekcyjnej). Temperatura powietrza, wilgotność względna temperatura punktu rosy i zawartość pary wodnej były rejestrowane w ciągu całego cyklu. Pomiar CO₂ i O₂ dokonywany był w kilku okresach 5 min.

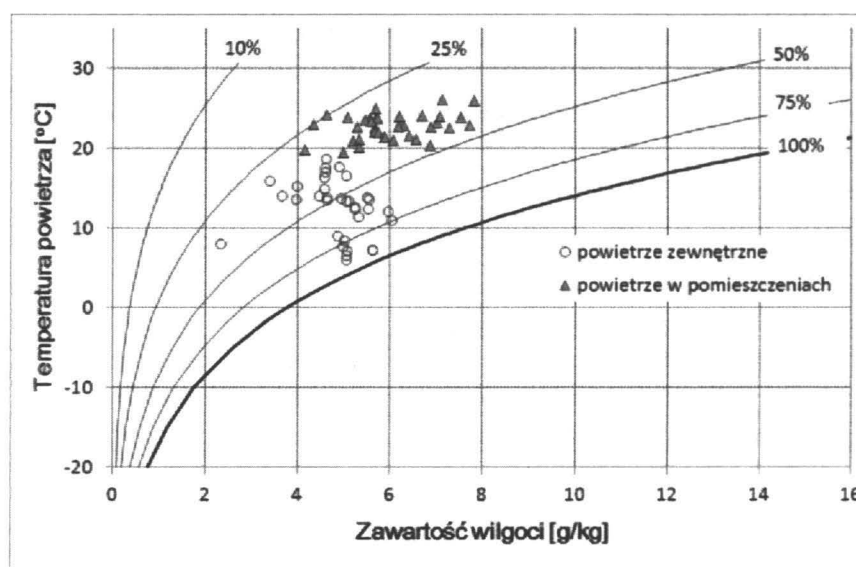
Pomiary zapylenia przeprowadzano naprzemiennie wymieniając trzy głowice frakcjonujące. Czas pojedynczego pomiaru wynosił 2 min.

3.2. Wyniki badań

W trakcie pomiarów temperatura powietrza w analizowanych pomieszczeniach zmieniała się w zakresie od 19,5 do 26,1°C. Jednocześnie wilgotność względna powietrza zmieniała się w zakresie od 24,6 do 45,1%. Rysunek 1 przedstawia cieplno-wilgotnościowe parametry

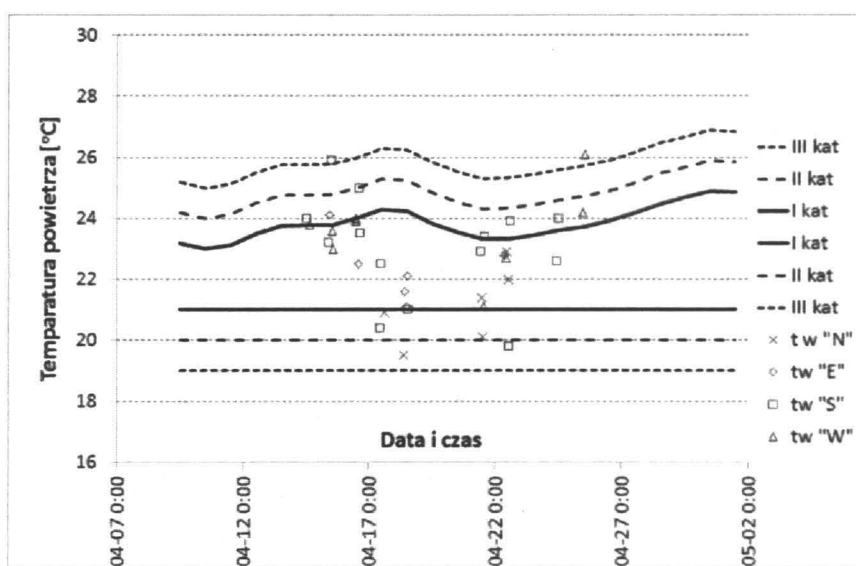
powietrza zewnętrznego i wewnętrznego na tle wykresu Molliera.

Ponieważ budynek pozbawiony jest instalacji chłodzenia powietrza ocenę stopnia spełnienia wymagań dokonano stosując model komfortu adaptacyjnego zgodny z PN-EN:152151:2012 [3]. Zmierzone wartości temperatury powietrza w pomieszczeniach (stosując różne oznaczenia punktów dla pomieszczeń zlokalizowanych na różnych fasadach) przedstawiono na rysunku 2. Na wykresie umieszczono także linie odpowiadające dotrzymaniu wymagań kategorii I, II i III (zgodnie z [3]). Wartości temperatury powietrza w pomieszczeniach skierowanych na różne strony świata zaznaczono różnymi znacznikami.



Rys. 1. Parametry cieplno-wilgotnościowe powietrza zewnętrznego oraz powietrza w analizowanych pomieszczeniach na tle wykresu Molliera.

Fig. 1. Thermo-humidity parameters of outdoor air and air in the analysed rooms on the Mollier chart.

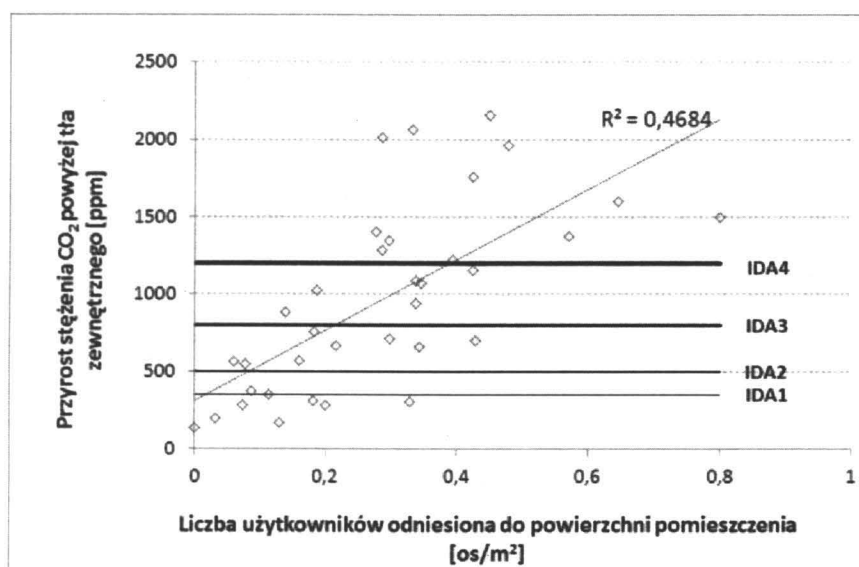


Rys. 2. Temperatura powietrza w analizowanych pomieszczeniach na tle zakresów dopuszczalnych dla różnych kategorii oczekiwań wg modelu komfortu adaptacyjnego.

Fig. 2. Air temperature in analysed rooms presented on the background of borders for different categories of rooms according to adaptive model of thermal comfort.

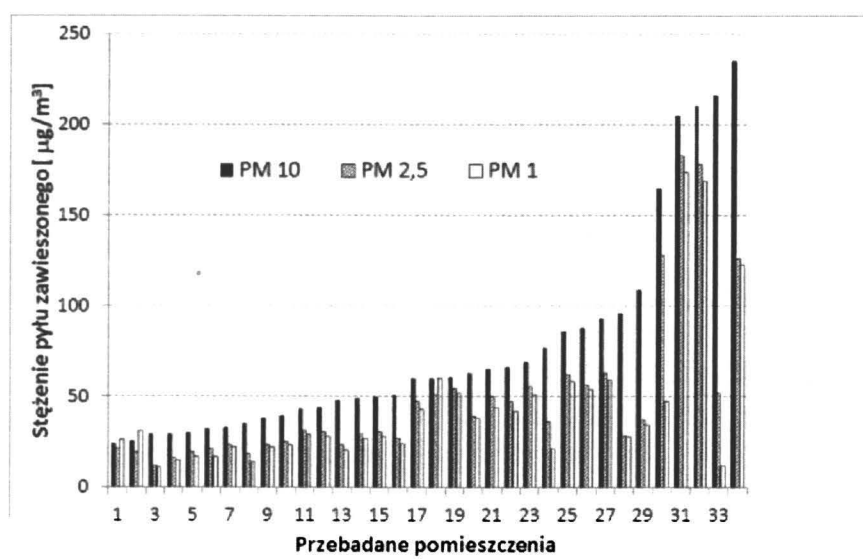
Można zaobserwować, że temperatury w pomieszczeniach skierowanych na południe i zachód są wyższe od temperatur powietrza w pomieszczeniach skierowanych na północ i wschód.

Pomiary stężenia dwutlenku węgla wykazały stężenia sięgające powyżej 2500 ppm (pomimo jedynie częściowego wykorzystania dostępnych miejsc). Stężenia CO₂ wykazały spodziewaną korelację z liczbą użytkowników przypadającą na 1 m² pomieszczenia. Rysunek 4 przedstawia uzyskaną zależność, przy czym stężenia zostały przedstawione, jako przyrosty powyżej tła zewnętrznego. Umożliwiło to zaznaczenie na rysunku sugerowanych wartości tych przyrostów odpowiadających kategoriom od IDA1 do IDA4 zgodnie z PN-EN 13779:2008 [4].



Rys. 4. Przyrost stężenia CO₂ powyżej tła zewnętrznego w funkcji zagęszczenia użytkowników.

Fig. 4. CO₂ concentration above outdoor as a function of occupancy density.

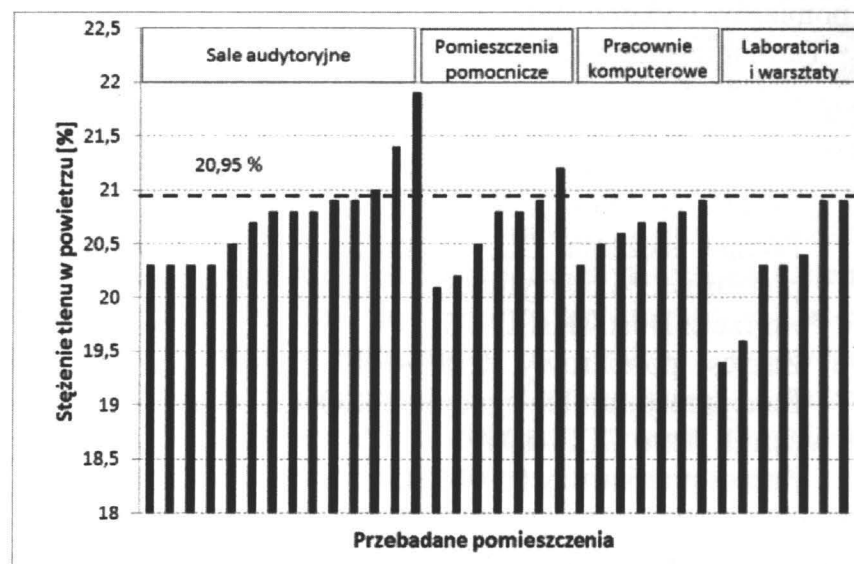


Rys. 5. Stężenia frakcji pyłu PM10, PM2,5 oraz PM1 w badanych pomieszczeniach (uporządkowane względem PM10).

Fig. 5. Concentrations of PM10, PM2,5 oraz PM1 in analysed rooms (sorted according to PM10).

Pomiary zapylenia wykazały bardzo duże zróżnicowanie pomiędzy pomieszczeniami. W grupie przebadanych pomieszczeń zidentyfikowano 5 pomieszczeń o stężeniach pyłu PM10 powyżej 150 µg/m³. Były to laboratorium biotechnologii, laboratorium betonu, warsztat, pomieszczenia księgozbioru bibliotecznego oraz gabinet z bardzo dużą ilością dokumentów.

Podwyższone stężenia pyłu zaobserwowano także w pomieszczeniach, w których podłogi były pokryte wykładziną dywanową oraz audytoriach, w których intensywnie wykorzystywano czarne tablice i kredę.



Rys. 6. Stężenia tlenu w analizowanych pomieszczeniach (wyniki uporządkowane dla różnych typów pomieszczeń).

Fig. 6. Oxygen concentration in analysed rooms (data sorted for different types of rooms).

W całym budynku zidentyfikowano wiele pomieszczeń o stężeniach tlenu obniżonych na tyle, iż nie da się ich wyjaśnić metabolizmem użytkowników. W przypadku laboratorium betonu, pomieszczeń przechowywania księgozbioru oraz w jednym z warsztatów zaobserwowano stężenia O₂ poniżej 20%. Z drugiej strony w 2 salach audytoryjnych położonych na 5 piętrze stwierdzono zawartość tlenu znacznie przekraczającą 21%. Okazało się, że przyczyną tego zjawiska mogą być ćwiczenia polegające na ozonowaniu wody przeprowadzane w sąsiednim Laboratorium Zakładu Zaopatrzenia w Wodę i Unieszkodliwiania Ścieków.

4. PARAMETRY POWIETRZA W BUDYNKACH SZKOLNICTWA WYŻSZEGO NA ŚWIECIE

W strefie klimatu umiarkowanego unika się chłodzenia pomieszczeń dydaktycznych w szkołach wyższych. Z jednej strony jest to podyktowane chęcią oszczędzania energii, a z drugiej strony faktem, iż w okresie największych upałów pomieszczenia te nie są wykorzystywane. Ponadto w większości szkół wyższych

nie stosuje się kodu ubraniowego i studenci mogą dość swobodnie korzystać z technik adaptacji behawioralnej, takich jak: zmiana ubioru, intensyfikacja prędkości powietrza wewnątrz pomieszczeń, przyjmowanie gorących/zimnych napojów oraz dość znacznej adaptacji psychologicznej do środowiska cieplnego [5]. Należy się także liczyć z możliwością zmian preferencji termicznych przez studentów. Przykładowo, w badaniach [6], [7] zaobserwowano zmianę preferencji z „lekko ciepło” i „ciepło” w okresie ogrzewania do preferencji „neutralnie” w okresie przejściowym.

W porównaniu z budynkami szkolnymi liczba badań dotyczących stężenia CO₂ w uczelniach wyższych jest niewielka. Można jednak znaleźć zarówno prace wykazujące, że w audytoriach i salach lekcyjnych przy sprawnie działającej wentylacji mechanicznej (USA) stężenia CO₂ sięgają poziomu ok 1000-1200 ppm [8] jak i prace [9] wykazujące, że w bezokiennej sali audytoryjnej przy celowo wyłączonej wentylacji mechanicznej (Polska) stężenia CO₂ osiągnęły wartości 6000-7000 ppm.

Szczególną uwagę warto zwrócić na badanie przeprowadzone w pracowniach komputerowych Uniwersytetu Technicznego w Lund [10], w którym bez wiedzy użytkowników zmieniano intensywność wentylacji pomiędzy wartościami 10-13 l/(s osobę) i 7 l/(s osobę). Odpowiadał temu zarówno wzrost stężenia CO₂ w pomieszczeniach jak i wzrost średniego stężenia pyłu PM10 z 15 µg/m³ do 20 µg/m³. W przypadku zmniejszonej wentylacji zaobserwowano wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia bólu głowy (iloraz szans - OR = 1,19 na 100 ppm przyrostu CO₂). Większy wpływ na występowanie symptomów SBS okazała się mieć podwyższona temperatura powietrza: podrażnienie oczu (OR = 1,52 na 1°C), błony śluzowej nosa (OR = 1,62 na 1°C), gardła (OR = 1,53 na 1°C), ból głowy (OR = 1,51 na 1°C) i zmęczenie (OR = 1,54 na 1°C). Zakres obserwowanych zmienności temperatury wynosił w tym badaniu 20÷25°C, a obserwowanych wartości wilgotności względnej 19÷35%. Pomiary w 40 różnych pomieszczeniach (głównie pokoje pracowników, pomieszczenia łączące funkcje biura i laboratorium oraz pomieszczenia kopiarek) zlokalizowanych na terenie uniwersytetu w Salonikach wykazały średnie stężenia pyłu PM10 wynoszące 118 µg/m³ przy odchyleniu standardowym 68 µg/m³ (wartości ekstremalne mieściły się w zakresie 25÷370 µg/m³). Stężenia frakcji PM2,5 wynosiły odpowiednio 91±56 µg/m³ (wartości ekstremalne 11÷250 µg/m³) [11].

Badanie opisujące zapylenie w przestrzeniach publicznych w Pekinie [12] zawiera także dane dotyczące pomieszczeń zlokalizowanych na uczelniach. Średnie stężenie pyłu w 5 pracowniach komputerowych wyniosło: pył całkowity 125,1 µg/m³, frakcja PM10 68,0 µg/m³, frakcja PM2,5 16,7 µg/m³ a frakcja PM1 7,5 µg/m³.

W pekińskich bibliotekach (5 obiektów) stężenia pyłu były znacznie niższe i wynosiły: pył całkowity 72,1 µg/m³, frakcja PM10 33,8 µg/m³, frakcja PM2,5 5,6 µg/m³, a frakcja PM1 1,9 µg/m³.

W bibliotekach uniwersyteckich we Włoszech mierzono znacznie większe zróżnicowanie pyłu całkowitego (40÷450) µg/m³ [13], [14].

5. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych pomiarów, jakkolwiek wskazują na niedotrzymanie wielu współczesnych wymagań i rekomendacji, nie odbiegają radykalnie od stanu jakości środowiska wewnątrz na uczelniach w innych krajach.

Przeprowadzone pomiary bezsprzecznie wykazały jednak, że koncepcja modernizacji analizowanego budynku do standardu nZEB powinna uwzględniać nie tylko technologie zmierzające do oszczędności energii, ale również przedsięwzięcia poprawiające jakość środowiska w pomieszczeniach.

Decyzji o rezygnacji z mechanicznego chłodzenia pomieszczeń dydaktycznych bezwzględnie powinno towarzyszyć zastosowanie rozwiązań architektonicznych ograniczających przegrzewanie pomieszczeń zlokalizowanych od strony południowej i zachodniej.

Przeprowadzone badania dowiodły, że w wielu pomieszczeniach gmachu WIBHIŚ realizowane są procesy wpływające zarówno na obniżanie jak i podwyższanie poziomu tlenu, a nietypowy system wentylacji grawitacyjnej powoduje przenoszenie problemów do sąsiednich pomieszczeń. Zlikwidowanie niekontrolowanych przepływów powietrza pomiędzy pomieszczeniami wydaje się zatem koniecznością. W pomieszczeniach dydaktycznych należy zaprojektować zdecentralizowaną wentylację mechaniczną o zmiennej wydajności. Niezbędne jest także dostosowanie do współczesnych wymagań instalacji wentylacji technologicznych w laboratoriach i warsztatach.

Planowaną modernizację warto wykorzystać także do wprowadzenia na teren gmachu WIBHIŚ dużej ilości roślin ozdobnych, które oprócz produkcji tlenu bardzo dobrze wpływają na poziom satysfakcji użytkowników i korzystnie wpływają na wyniki uczenia się [15].

Aby sprawdzić skuteczność podjętych działań zmodernizowany budynek powinien zostać wyposażony w sensory monitorujące parametry mikroklimatu oraz jakość powietrza, co najmniej w wybranych pomieszczeniach. Znane są udane przykłady wykorzystania bezprzewodowych sieci pomiarowych dla dużych pomieszczeń audytoryjnych (np. [16]).

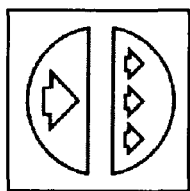
INDOOR AIR PARAMETERS IN HIGHER EDUCATION BUILDING BEFORE PLANNED MODERNIZATION TO NZEB STANDARD

Summary: The project KODnZEB aims to improve knowledge of Polish experts in the field of technologies used during modernization of public buildings to nearly zero-energy standard. One of the case study buildings is Faculty of Building Services, Hydro and Environmental Engineering at Warsaw University of Technology. The paper describes measurements carried out in 32 rooms of different character (approx. 20% of 163 rooms where the teaching process is realized). The measurements were performed during 10 days in spring when weather was variable (the range of outdoor temperature from 6.6 to 18.7°C). Serious problems with microclimate were identified in computer rooms. Moreover, the analysis indicated that rooms located at southern and western façades are more extensively overheated. CO₂ concentrations up to 2500 ppm were measured in teaching auditoria. The highest concentrations of fine dust (PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁) were observed in laboratories. Increased concentrations of dust were monitored in rooms with carpets as well as in rooms with extensive use of black boards and chalk. The performed measurements indicated that modernization concept should take into account not only energy saving innovations, but also should substantially improve indoor air parameters.

Literatura

- [1] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 *on the energy performance of buildings (recast)*. Official Journal of the European Union, 18(06), 2010
- [2] Sowa J., Wiszniewski A., *Opportunities and limitations of transfer of know-how on sustainable buildings between countries, experiences from cooperation between Norway and Poland*, CESB16 Central Europe towards Sustainable Building 2016, 22–24 June 2016 Prague, ISBN 978-80-271-0248-8, printed version pp.95-96, electronic version pp 291-298
- [3] Norma PN-EN 15251:2012. *Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę*
- [4] Norma PN-EN 13779:2008. *Wentylacja budynków niemieszkalnych - Wymagane właściwości systemów wentylacji i klimatyzacji*
- [5] Yao R., Liu J., Li B. *Occupants' adaptive responses and perception of thermal environment in naturally conditioned university*. Applied Energy 87(3) (2010) 1015-1022
- [6] Corgnati S. P., Ansaldi R., & Filippi M. *Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons: assessment through objective and subjective approaches*. Building and Environment 44(4) (2009) 785-792
- [7] Corgnati S. P., Filippi M., & Viazzo S. *Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort*. Building and Environment 42(2) (2007) 951-959
- [8] Luu I., Brown G. *Indoor Air Quality Assessment of Campus Spaces with Carbon Dioxide (CO₂) as a Measure of Adverse Health Effects*. (2015). www.overleaf.com
- [9] Cichowicz R., Gawron-Skarbek A., Godala M., Zimna-Walendzik E., Sabiniak H., & Szatko F. *Ocena stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wybranych pomieszczeń uczelni wyższej*. Probl Hig Epidemiol 95(2) (2014) 287-291
- [10] Norbäck D., Nordström K. *Sick Building Syndrome in Relation to Air Exchange rate, CO₂, room temperature and relative air humidity in university computer classrooms: an experimental study*. International Archives of Occupational and Environmental Health 82(1) (2008) 21-30
- [11] Gemenetzi P., Moussas P., Arditoglou A., & Samara C. *Mass concentration and elemental composition of indoor PM 2.5 and PM 10 in University rooms in Thessaloniki, northern Greece*. Atmospheric Environment 40(17) (2006) 3195-3206
- [12] Liu Y., Chen R., Shen X., & Mao X. *Wintertime indoor air levels of PM 10, PM 2.5 and PM 1 at public places and their contributions to TSP*. Environment International 30(2) (2004) 189-197
- [13] Fantuzzi G., Aggazzotti G., Righi E., Cavazzuti L., Predieri G., & Franceschelli A. *Indoor air quality in the university libraries of Modena (Italy)*. Science of the Total Environment 193(1) (1996) 49-56
- [14] Righi E., Aggazzotti G., Fantuzzi G., Ciccacese V., & Predieri G. *Air quality and well-being perception in subjects attending university libraries in Modena (Italy)*. Science of the Total Environment 286(1) (2002) 41-50
- [15] Doxey J. S., Waliczek T. M., & Zajicek J. M. *The impact of interior plants in university classrooms on student course performance and on student perceptions of the course and instructor*. HortScience 44(2) (2009) 384-391
- [16] Leavey A., Fu Y., Sha M., Kutta A., Lu C., Wang W., ... & Biswas P. *Air quality metrics and wireless technology to maximize the energy efficiency of HVAC in a working auditorium*. Building and Environment 85 (2015) 287-297

Niniejszy artykuł powstał w ramach projektu KODnZEB pn: "Koncepcja dostosowania dwóch wybranych budynków do standardu niemal zero-energetycznego" dofinansowanego ze środków Mechanizmu Finansowego EOG 2009-2014 w ramach w ramach Funduszu Współpracy Dwustronnej na poziomie Programu Operacyjnego PL04 "Oszczędzanie energii i promowanie odnawialnych źródeł energii". Projekt realizowany we współpracy z Norweskim Uniwersytetem Nauki i Technologii.



NATEŻENIE OŚWIETLANIA OGÓLNEGO W NAROŻACH SALI DYDAKTYCZNEJ PRZY RÓŻNYCH RODZAJACH FOTOKLIMATU

Henryk ŻELAZNY*

*Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Instytut Budownictwa
ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, e-mail: hzelazny@ath.bielsko.pl*

Streszczenie: Celem pracy była ocena kształtowania się jasności na ławkach ustawionych w narożach akademickiej sali dydaktycznej w porównaniu do stojących w środkowej części pomieszczenia przy oświetleniu naturalnym, sztucznym i mieszanym. Badania przeprowadzono w stosunkowo małej pracowni z dwoma dużymi oknami, zorientowanymi na południową stronę świata. Pomieszczenie wyposażone było w lampy typu świetlówki. Sondę luksomierza ustawiano na blatach ławek, czyli w płaszczyźnie roboczej, w której studenci wykonywali operacje typu pisanie lub kreślenie. Nie stwierdzono bardziej niekorzystnych wartości natężenia oświetlenia na ławkach znajdujących się w narożach audytorium przy jego oświetleniu w sposób naturalny, za pomocą elektryczności oraz w przypadku łącznego wykorzystania okien i lamp do uzyskania komfortu wizualnego we wnętrzu. Jednak dla uzyskania bardziej uogólnionych wyników badań należałoby wykonać podobne pomiary w pomieszczeniu dydaktycznym o dużo większej powierzchni i z większą ilością ławek.

Słowa kluczowe: natężenie oświetlenia, sala dydaktyczna, fotoklimat.

1. WSTĘP

Pomieszczenia funkcjonalnie przystosowane do pracy dydaktycznej nazywa się pracowniami, a do niezbędnych warunków higienicznych pracy w tego typu wnętrzach należą między innymi oświetlenie światłem naturalnym i sztucznym [13]. Do oceny światła, czyli promieniowania widzialnego, obejmującego zakres długości fali od 380 do 780 nm, stosuje się między innymi wielkość fotometryczną *natężenie oświetlenia (jasność)*. Określa ona gęstość powierzchniową strumienia świetlnego (stanowiącego miarę mocy świetlnej, będącej iloczynem mocy mechanicznej i względnej skuteczności świetlnej danego światła) padającego na pewną powierzchnię, a miarą tej wielkości jest stosunek padającego strumienia świetlnego do wielkości powierzchni oświetlonej. W zależności od

nierównomiernego lub równomiernego rozprzestrzeniania się strumienia świetlnego natężenie oświetlenia, którego jednostką jest lux (Lx), oblicza się ze wzorów [9]:

$$E = d\phi \cdot dF^{-1} \quad \text{lub} \quad E = \phi \cdot F^{-1}$$

gdzie:

ϕ – strumień świetlny, Lm,

F – powierzchnia oświetlona, m².

Środowisko świetlne, obok akustycznego i cieplnego, należy do najistotniejszych elementów fizycznego środowiska pracy [1]. W przypadku wykorzystania światła dziennego najnowsze systemy sterowania parametrami środowiska wewnętrznego pozwalają uzyskać pożądany komfort użytkowników [7]. Aby go zagwarantować w zamkniętych przestrzeniach do nauki najwłaściwsze jest oświetlenie jednostronne, ale tylko do głębokości pomieszczenia nieprzekraczającej 6,0 m [6], ponieważ przy naturalnym oświetleniu bocznym jasność znacznie spada w miarę oddalania się od otworów okiennych [10]. W prostokątnych salach dydaktycznych z zasady projektuje się takie jednostronne oświetlenie światłem dziennym, ale z zapewnieniem wszystkim słuchaczom oświetlenia miejsca pracy z lewej strony [13]. W zagadnieniach oświetleniowych, a więc także w uzyskaniu właściwego komfortu wizualnego w audytoriach akademickich, najważniejsze jest natężenie i równomierność oświetlenia [10]. Stosunkowo równomiernego rozłożenia światła wymaga zwłaszcza poprawne oświetlenie stanowisk pracy [12], którymi dla studentów są blaty ławek, służące do pisania lub kreślenia. Wewnętrzne natężenie oświetlenia naturalnego różni się jednak w poszczególnych miejscach pomieszczenia, przy czym szczególnie duże różnice daje właśnie stosowane w salach dydaktycznych oświetlenie boczne [10]. Nierównomierność oświetlenia dziennego stwarza znaczne utrudnienia głównie w dużych pomieszczeniach. [11]. Pomimo, że oświetlenie naturalne ma dobroczynny wpływ na zdrowie i psychikę człowieka

*Autor korespondencyjny, e-mail: hzelazny@ath.bielsko.pl

[10], to nierównomierność oświetlenia różnych punktów w tym samym pomieszczeniu jest poważną wadą tego rodzaju światła [12]. Ponadto prowadzenie pomiarów oświetlenia wewnątrz w warunkach rzeczywistych przy dynamice zmian, jak i przy braku powtarzalności tych samych warunków oświetleniowych jest zadaniem niezwykle trudnym [19].

Podobnie jak światło dzienne także światło elektryczne musi zapewniać właściwy fotoklimat, czyli prawidłowe oświetlenie zarówno otoczenia, jak i płaszczyzn pracy [4]. Troska o zachowanie właściwych warunków widzenia przy oświetleniu sztucznym powinna być podparta świadomością, iż elektryczne źródła w miarę eksploatacji tracą stopniowo skuteczność świetlną i natężenie oświetlenia z czasem maleje ze względu na starzenie się lamp oraz pokrywanie się pyłem i brudem [11]. Zważywszy na to ile godzin w ciągu roku spędza się przy sztucznym fotoklimacie pracując i odpoczywając, musi budzić zdziwienie fakt, że tak mało uwagi przywiązuje się do zachowania odpowiedniego komfortu wizualnego przy tego rodzaju oświetleniu [14]. Na uczelniach zajęcia akademickie odbywają się nieraz do późnych godzin wieczornych, stąd istnieje potrzeba częstego doświetlania wewnątrz dydaktycznych elektrycznymi źródłami światła. Zagwarantowanie więc w takich warunkach właściwego komfortu świetlnego jest problemem bardzo ważnym.

Istotę problemu należytego oświetlania środowiska ludzi oddaje fakt, że proces widzenia uruchamia około 80% impulsów nerwowych i powoduje zużycie 25% energii życiowej człowieka [11]. Wydolność wzrokowa w połączeniu z wygodą widzenia określa osiągalny poziom niezawodności odbioru informacji przez oko [5]. Ogranicza lub w ogóle wyklucza pracę zmysłu wzroku niewłaściwe oświetlenie [12], dlatego komfort wizualny musi być taki, aby pozwolić na osiągnięcie określonej wydajności wzrokowej [20]. Zatem w celu zagwarantowania poprawnego i nieszkodliwego widzenia warunki świetlne w przestrzeniach użytkowanych przez człowieka powinny być dostosowane do właściwości narządu wzroku [3] i umożliwiać łatwe oraz bezpieczne wykonywanie czynności [2], poprzez zdolność prawidłowego rozróżniania szczegółów bez nadmiernego zmęczenia wzroku [21]. Wagę jakości warunków świetlnych podkreśla fakt, że podczas pracy człowiek za pomocą zmysłu wzroku odbiera najwięcej, bo aż 85÷90% wrażeń i informacji [16]. W praktyce istnieje niemal nieskończona różnorodność zadań wzrokowych [5]. Odnosząc je nie tylko do pracy umysłowej człowieka, ale także do typowych operacji produkcyjnych uważa się, że niedostateczne oświetlenie stanowisk roboczych i ich otoczenia utrudnia wykonywanie pracy, a w szczególności [11]:

- 1) wywołuje zaburzenia wzroku i wzrost napięcia nerwowego,
- 2) pogarsza nastrój i samopoczucie pracowników,
- 3) przyspiesza zmęczenie,
- 4) zwiększa ryzyko przy pracy,

- 5) utrudnia rozróżnienie barw,
- 6) opóźnia podejmowanie decyzji,
- 7) obniża sprawność służby ruchu i transportu wewnętrznego,
- 8) pogarsza jakość wyrobów,
- 9) obniża wydajność pracy,
- 10) utrudnia zachowanie czystości i ładu.

Ponadto nieodpowiednie warunki oświetlenia przyczyniają się do zmęczenia wzroku [16], które objawia się osłabieniem widzenia, bólami głowy oraz pogarszaniem się takich wad wzroku, jak stygmatyzm, zez, krótkowzroczność i dalekowzroczność [11]. Zły stan oświetlenia może powodować łzawienie oraz zaczerwienienie powiek i spojówek, zmniejszenie zdolności akomodacji soczewki oka, ostrości widzenia, wrażliwości na kontrasty i szybkości spostrzegania [8]. Z uwagi na bezpieczeństwo pracy najistotniejszy jest fakt, że występuje bliski związek między poprawą oświetlenia a spadkiem wypadków przy pracy [20]. Oświetlenie jednak wpływa w istotny sposób nie tylko na operacje wykonywane przez człowieka, ale i na jego samopoczucie [12]. Ważne jest zatem stworzenie takich warunków dla odbioru i przekazywania informacji, by praca była bezpieczna, efektywna i przyjemna [21]. Z wszystkich tych przesłanek wynika, że jakość oświetlenia w istotny sposób wpływa na zwiększenie rezultatów pracy [12].

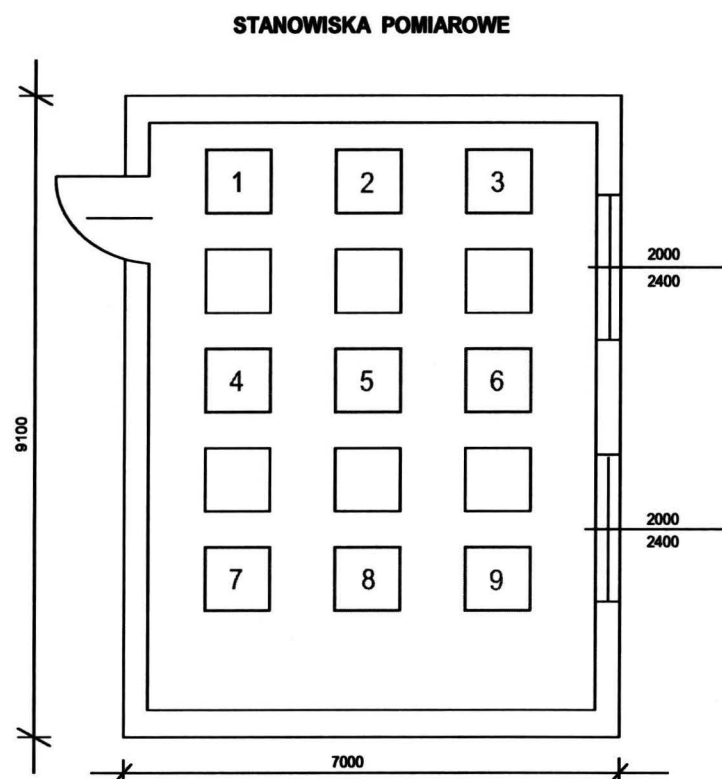
Komfort wizualny we wnętrzu poprawić mogą wtórne źródła światła, którymi we wnętrzu są sufit i ściany [3]. Mogą one jednak powodować także zmniejszanie się sprawności oświetlenia poprzez mały współczynnik odbicia światła (powierzchnie o ciemnych kolorach i zabrudzone), powodując pochłanianie części światła wysyłanego przez oprawę [17]. Dlatego istotną rolę przy planowaniu oświetlenia odgrywa wiedza, doświadczenie, wyobraźnia, a także wrażliwość estetyczna projektanta [21].

Celem pracy była ocena kształtowania się jasności na ławkach ustawionych w narożach akademickiej sali dydaktycznej w stosunku do ławek znajdujących się w środkowej części pomieszczenia przy stosowaniu oświetlenia naturalnego, sztucznego i mieszanego.

2. MATERIAŁ I METODY

Kształtowanie się natężenia oświetlenia ogólnego w pomieszczeniu, mierzonego na ławkach, czyli w polach zadań wzrokowych studentów, oceniano słonecznego, wiosennego dnia od godz. 12.00 w niewielkiej sali dydaktycznej budynku uczelnianego, której uproszczony rzut przekroju poziomego zamieszczono na rys. 1. Wnętrze o wysokości 3,15 m wyposażone było w 15 stołów, ustawionych po trzy sztuki w pięciu szeregach prostopadłych do ściany z oknami. Błaty ławek w stosunku do podłogi były zamocowane na poziomie 0,77 m.

Wszystkie miejsca siedzące zwrócone były w kierunku jednej ściany poprzecznej z zawieszoną tablicą, stąd każdy student płaszczyznę ławki miał oświetloną światłem naturalnym od lewej strony. Na dziewięciu stołach wyznaczono punkty pomiarowe, numerując je począwszy od drzwi wejściowych od 1 do 9, co przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat pomieszczenia dydaktycznego z zaznaczeniem numerów stanowisk pomiarowych, na których oceniano natężenie oświetlenia ogólnego

Fig. 1. Scheme of the teaching room with indication of positions for measurement, where the overall light intensity was evaluated

Jakość komfortu wizualnego identyfikowano przy trzech rodzajach oświetlenia sali audytoryjnej: naturalnym, sztucznym i mieszanym. Na naturalne warunki świetlne w pomieszczeniu wpływały wbudowane w ścianę zwróconą na południową stronę świata dwa okna z dwoma szybami zamocowanymi w ramach wykonanych z PCV. Gwarantowały one zachowanie wymaganej proporcji powierzchni otworów okiennych do powierzchni podłogi w stosunku 1:8 [18]. Oświetlenie elektryczne stanowiło osiem punktów świetlnych sufitowych, rozstawionych w dwóch rzędach, to jest wzdłuż okien i wzdłuż ściany wewnętrznej. Równomierne rozmieszczenie czterech opraw oświetleniowych na suficie w jednym rzędzie, co ok. 1,8 m przyczyniało się do tego, że w każdym miejscu oceny warunków widzenia punkt świetlny znajdował się w niedużej odległości przed stanowiskiem pomiarowym. Z kolei ułożenie rzędów tych opraw mniej więcej nad przejściami między ławkami powodowało docieranie promieni świetlnych z lamp na płaszczyzny robocze pod

niewielkim skosem od lewej lub prawej strony. W każdej oprawie z odbłyśnikami oraz wbudowanymi układami stabilizacyjno-zapłonowymi znajdowały się dwie świetlówki liniowe o średnicy 26 mm i mocy 36 W, zapewniając w pomieszczeniu tak zwane oświetlenie wyłącznie bezpośrednie [11]. W okresie prowadzenia badań nad poziomem oświetlenia sztucznego dla wyeliminowania dodatkowego oświetlenia wnętrza światłem słonecznym otwory okienne od środka zasłonięte były szczelnymi żaluzjami, co pozwoliło uzyskać w czasie dnia warunki w bardzo dużym stopniu zbliżone do panujących przy oświetleniu sztucznym sali.

Wtórnymi źródłami światła w audytorium były biały sufit, ściany pomalowane na kolor jasno seledynowy i posadzka wykonana z gładkiej wykładziny o barwie popielatej.

Jasność na blatach ławek mierzono luxomierzem L-20A zgodnie z wymaganiami normy [15]. Pomiary wykonywano w ten sposób, aby podczas odczytu osoba obsługująca luxomierz nie rzucała cienia na odbiornik. Jako wynik odczytu natężenia oświetlenia dla każdego stanowiska przyjmowano średnią z trzech powtórzeń oznaczenia jasności. Wartości uzyskane w badaniach przedstawiono w sposób graficzny na wykresach. Z normy [15] przyjęto wymagane natężenie oświetlenia dla sal wykładowych 500 Lx, przy czym podczas wykonywania rysunków technicznych powinno ono wynosić aż 750 Lx.

3. WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

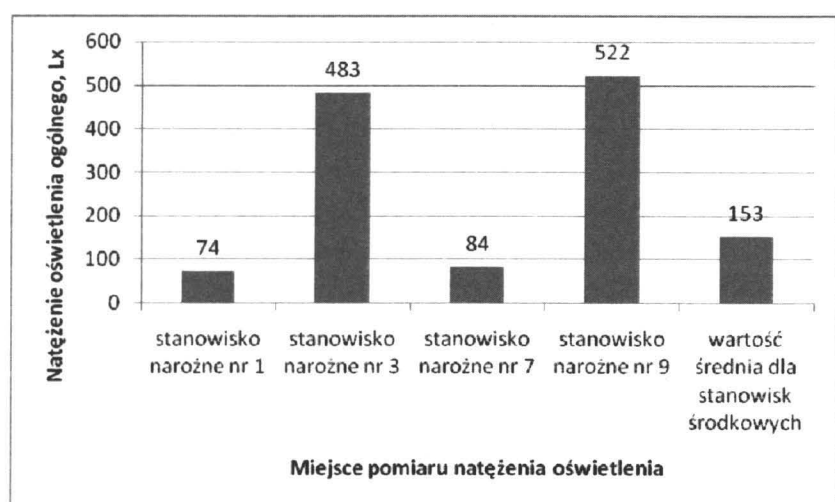
W tab. 1 zamieszczono uśrednione z trzech prób pomiarowych wartości natężenia oświetlenia na poszczególnych stanowiskach pomiarowych przy naturalnym, sztucznym i mieszanym oświetleniu sali audytoryjnej.

Tab. 1. Średnie wartości natężenia oświetlenia na poszczególnych stanowiskach pomiarowych w sali dydaktycznej pomierzone dla oświetlenia naturalnego, sztucznego i mieszanego

Tab. 1. Average values of illuminance on measurement stations in didactic room measured for natural lighting, artificial and mixed

Nr stan. pomiar.	Oświetlenie naturalne [Lx]	Oświetlenie sztuczne [Lx]	Oświetlenie mieszane (naturalne ze sztucznym) [Lx]
1	74	1079	1155
2	147	1018	1175
3	483	1270	1501
4	96	1001	1095
5	155	1009	1168
6	207	1195	1415
7	84	942	1080
8	161	988	1157
9	522	1158	1523

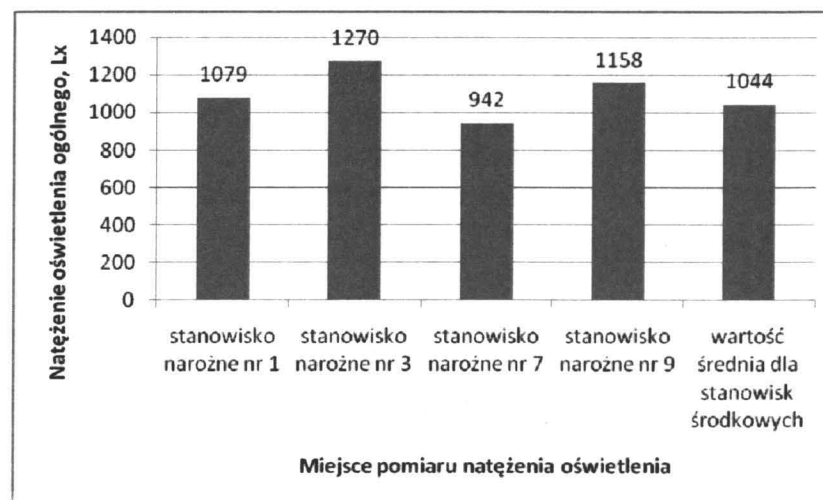
Na rys. 2 przedstawiono kształtowanie się natężenia oświetlenia ogólnego na ławkach przy utrzymywaniu naturalnego fotoklimatu w sali dydaktycznej. Nie zauważono podczas prowadzenia tych oznaczeń wpływu promieniowania kierunkowego na kontrasty luminacji. Średnia jasność z pięciu środkowych punktów pomiarowych wyniosła 153 Lx i jedynie stanowiska badawcze nr 1 i 7 miały znacząco obniżone warunki widzenia w płaszczyznach roboczych. Natężenie oświetlenia wyniosło na nich 74 i 84 Lx, czyli było o wiele mniejsze od wymaganej przy pisaniu wartości 500 Lx. Stoliki znajdujące się w narożach przy zewnętrznej ścianie z oknami cechowały się w miarę korzystnymi parametrami i znacznie większymi od średniej wartości obliczonej dla środkowej części audytorium, a na blacie, na którym wyznaczono dziewięć stanowisko pomiarowe jasność przekroczyła minimum ustalone dla tego typu pomieszczeń. Na podstawie tej części badań, czyli przeprowadzonych przy naturalnym oświetleniu pracowni, bardziej zauważalny jest spadek jakości komfortu wizualnego wraz z oddalaniem się stanowisk pomiarowych od otworów okiennych, niż istotne obniżenie się warunków widzenia na skrajnych ławkach ustawionych w kątach pomieszczenia, gdzie można by przypuszczać, że występuje ograniczone docieranie promieni słonecznych. Próbuując zinterpretować dość niską wartość średniego natężenia oświetlenia naturalnego wyznaczonego dla ławek ustawionych w środkowej części wnętrza dydaktycznego, należy podkreślić znaczący wpływ filarka międzyokiennego na powstawanie cienia w centralnej części pracowni.



Rys. 2. Natężenie oświetlenia naturalnego na ławkach ustawionych w narożach pomieszczenia dydaktycznego oraz wartość średnia tego parametru obliczona dla pozostałych punktów pomiarowych

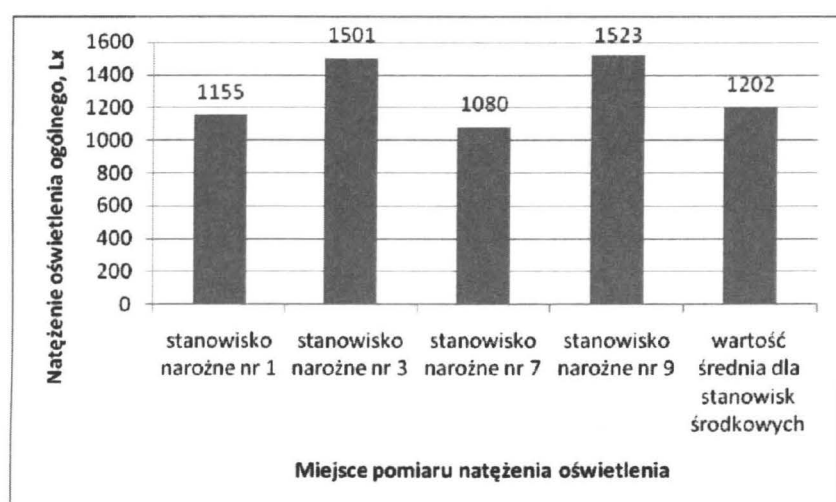
Fig. 2. Intensity of natural lighting on benches in corners of the lab and average value of this parameter calculated for other measuring points

Zróznicowanie natężenia oświetlenia w narożnych ławkach w stosunku do wartości średniej, obliczonej dla środkowej części pomieszczenia przy sztucznym fotoklimacie we wnętrzu przedstawiono na rys. 3. Równomierny rozstaw opraw z lampami świetłówkowymi spowodował w miarę podobne warunki widzenia w całej sali dydaktycznej. Tylko w jednym rogu audytorium, to znaczy na stanowisku pomiarowym nr 7, jasność (942 Lx) w płaszczyźnie pracy studenta miała niższą wartość od średniej z centralnej części pracowni, wynoszącej 1044 Lx. Wartości natężenia oświetlenia oznaczone na wszystkich punktach przekraczały 500 Lx, a więc były właściwe dla czynności typu pisanie, a ponadto były także odpowiednie dla procesu kreślenia, przy którym wymagana jest jasność na poziomie, co najmniej 750 L.



Rys. 3. Natężenie oświetlenia sztucznego na ławkach ustawionych w narożach pomieszczenia dydaktycznego oraz wartość średnia tego parametru obliczona dla pozostałych punktów pomiarowych
Fig. 3. Intensity of artificial lighting on benches in corners of the lab and average value of this parameter calculated for other measuring points

Na rys. 4 przedstawiono wartości natężenia oświetlenia ogólnego, pomierzonego na ławkach przy oświetleniu mieszanym w różnych częściach pomieszczenia przeznaczonego dla studentów. Z uwagi na mniej korzystne nasłonecznienie stolików z punktami pomiarowymi nr 1 i 7 (rys. 2), przy łącznym oświetleniu sali, tzn. za pomocą okien wraz z działającymi lampami elektrycznymi, tylko na tych dwóch płaszczyznach roboczych jasność wynosząca odpowiednio 1155 Lx i 1080 Lx odbiegała od wartości średniej z wykonanych oznaczeń dla pozostałych punktów pomiarowych, równej 1202 Lx. Na każdym blacie stolików przeznaczonych do różnych czynności w czasie zajęć akademickich komfort wizualny był odpowiedni. Natężenie oświetlenia przekraczało dolne progi, czyli 500 Lx dla pisania i 750 Lx dla kreślenia.



Rys. 4. Natężenie oświetlenia mieszanego na ławkach ustawionych w narożach pomieszczenia dydaktycznego oraz wartość średnia tego parametru obliczona dla pozostałych punktów pomiarowych

Fig. 4. Intensity of mixed lighting on benches in corners of the lab and average value of this parameter calculated for other measuring points

4. STWIERDZENIA I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące stwierdzenia i wnioski:

A. Stwierdzenia:

1. Jedynie przy naturalnym oświetleniu sali dydaktycznej na ławkach ustawionych w dwóch narożach przy ścianie wewnętrznej odnotowano wyraźny spadek jasności w stosunku do wartości średniej tego parametru, obliczonej dla punktów pomiarowych znajdujących się w środkowej części pomieszczenia.
2. Na płaszczyznach roboczych stolików znajdujących się w narożach audytorium przy ścianie z oknami natężenie oświetlenia naturalnego było przeszło dwukrotnie większe od średniego z oznaczeń wykonanych na ławkach środkowych.
3. Natężenie oświetlenia sztucznego, podobnie jak natężenie tego rodzaju oświetlenia wzbogaconego światłem dziennym, czyli mieszanego, było w miarę równomierne w całym wnętrzu i na skrajnych stolikach nie odbiegało istotnie od uśrednionej jasności pomierzonej na płaszczyznach roboczych w pozostałej części pomieszczenia.
4. Przy oświetleniu elektrycznym, a tym bardziej przy mieszanym, jasność na blatach stolików narożnych, podobnie jak w pozostałych punktach pomiarowych, przekraczała wartości minimalne, określone dla czynności typu pisanie i kreślenie.

B. Wnioski:

1. W badaniach prowadzonych przy oświetleniu światłem słonecznym w dwóch narożach przy ścianie wewnętrznej jasność w płaszczyznach

roboczych była znacznie niższa od obliczonej średniej dla środkowej części pomieszczenia, ale raczej wynikało to ze stosunkowo dużej odległości od otworów okiennych, a nie z usytuowania ławek w kątach sali akademickiej.

2. Nie stwierdzono bardziej niekorzystnych wartości natężenia oświetlenia na ławkach znajdujących się w narożach sali dydaktycznej w stosunku do uśrednionej jasności na blatach stolików zbliżonych do środka pracowni przy jej oświetleniu za pomocą elektryczności oraz w przypadku łącznego wykorzystania okien i lamp.
3. W celu uzyskania uogólnionych wyników badań należałoby wykonać podobne pomiary w pomieszczeniu dydaktycznym o dużo większej powierzchni i z większą ilością ławek – w takim przypadku spodziewane byłoby obniżenie się komfortu wizualnego w narożnych stolikach, bardziej oddalonych od okien i sufitowych punktów świetlnych instalacji elektrycznej.

GENERAL ILLUMINATION IN CORNERS OF DIDACTIC ROOM AT DIFFERENT TYPES OF LIGHTING

Summary: The aim of this study was to evaluate formation of brightness on benches in corners of didactic room compared to benches in center of the room at natural lighting, artificial and mixed. Researches were conducted in small lab with two large windows oriented to the south side of the world. The room was equipped with a fluorescent lamp. The probe of the light meter set on benches that is, in a working plane where students wrote and scrabbled. Not found more adverse illuminance on benches in corners of the lab at natural lighting, artificial and mixed. However, to obtain more generalized findings should perform similar measurements in bigger didactic room with more benches.

Literatura

- [1] Arct Z. *Projektowanie architektoniczne zakładów przemysłowych*. Arkady, Warszawa 1974
- [2] Bąk J. *Obliczanie oświetlenia ogólnego wnętrz*. WN-T, Warszawa 1983
- [3] Bąk J. *Oświetlanie mieszkań*. WN-T, Warszawa 2000
- [4] Berndt-Kostyrzewska J., Żelazna K. *Wiejskie gospodarstwo domowe. Organizacja Pracy i Przestrzeni*. PWRiL, Warszawa 1987
- [5] Bonnel W. J. M., Boer J. B. *Oświetlenie dróg*. WkiŁ, Warszawa 1984
- [6] Charytonow E. *Projektowanie architektoniczne*. WSiP, Warszawa 1985

- [7] Heim D., Jędrzejuk H., Szczepańska E., Metody określania parametrów oświetlenia uzupełniającego dla potrzeb optymalizacji wielokryterialnej budynków mieszkalnych – energochłonność oświetlenia, *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce* tom V, Nr 4 (2010) 5÷8
- [8] Idczak D. *Ergonomia w kształtowaniu warunków pracy. Materiały pomocnicze do szkoleń*. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr Sp. z o. o., Gdańsk 1999
- [9] Klemm P. *Światło w pomieszczeniach*. [w:] Klemm P. (red.) *Budownictwo ogólne. Tom 2. Fizyka budowli*. Arkady Warszawa 2005
- [10] Kral L. *Elementy budownictwa przemysłowego. Tom I Budynki przemysłowe*. PWN, Warszawa 1984
- [11] Mirski Z. *Kształtowanie wnętrz produkcyjnych*. Arkady, Warszawa 1986
- [12] Pałaszewski T. *Czynniki efektywności kształtowania przestrzennego środowiska człowieka*. PWN, Warszawa 1983
- [13] Parczewski W., Tauszyński K. *Projektowanie obiektów użyteczności publicznej*. WSiP, Warszawa 2009
- [14] Pearson D. *Przyjazny dom*. Wyd. MURATOR Warszawa 1998
- [15] PN-EN 12464-1:2012 Światło i oświetlenie - Oświetlenie miejsc pracy - Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach
- [16] Rajkiewicz M. *Oświetlenie na stanowisku pracy*. [w:] Lewandowski J. (red.) *Ergonomia. Materiały do ćwiczeń i projektowania*. „MARCUS” S.C., Łódź 1995
- [17] Ratajczyk I. *Elektryfikacja obiektów rolniczych*. [w:] Witebski Z. (red.) *Budownictwo rolnicze. Część 2. Konstrukcje budowlane i instalacje*. Arkady, Warszawa 1982
- [18] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (z późniejszymi zmianami)
- [19] Szczepańska-Rosiak E., Heim D., Analiza natężenia oświetlenia w pomieszczeniu w aspekcie rozkładu luminacji na nieboskłonie całkowicie zachmurzonym, *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, Łódź, 2013, s. 149÷154
- [20] Szparkowski Z. *Architektura współczesnej fabryki*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa 1999
- [21] Wolska A., Pawlak A. *Oświetlenie pomieszczeń i stanowisk pracy*. [w:] Bezpieczeństwo i Ochrona Człowieka w Środowisku Pracy. T. 12. CIOP-PIB, Warszawa 2001

ISSN 1734-4891