

Spis treści

Grzegorz KOWALEWSKI, Izabela KOSTECKA, Walery JEZIERSKI

Ocena komfortu cieplnego w jednorodzinny budynku mieszkalnym po jego termomodernizacji

Assessment of thermal comfort in the single-family residential building after its thermal-modernisation..... 67

Kamil RAWSKI

Analiza przewietrzania i wentylacji miasta Białegostoku

Analysis of ventilating Białystok city..... 75

Błażej SMOLIŃSKI

Instalacja georur w świetle badań polowych i laboratoryjnych

Installation of geotubes based on laboratory and field tests 81

Marcin SZKOBODZIŃSKI, Czesław MIEDZIAŁOWSKI

Analiza porównawcza ciśnienia wiatru na budynek na podstawie badań tunelowych, symulacji komputerowych i norm projektowych

Comparative analysis of wind pressure on a building based on wind tunnel study, computer simulations and design standards..... 87

Michał TARGOŃSKI

Niskokosztowy, bezzałogowy statek powietrzny wyposażony w kamerę niemetryczną jako źródło danych wysokościowych

Low-cost, unmanned aerial vehicle with non-metric camera as a source of elevation data 97

Urszula WYDRO, Elżbieta WOŁEJKO, Agata JABŁOŃSKA-TRYPUĆ,

Andrzej BUTAREWICZ, Tadeusz ŁOBODA

Wpływ osadu ściekowego na aktywność biologiczną gleb

The impact of sewage sludge on a biological activity of urban soil..... 103

OCENA KOMFORTU CIEPLNEGO W JEDNORODZINNYM BUDYNKU MIESZKALNYM PO JEGO TERMOMODERNIZACJI

Grzegorz KOWALEWSKI*, Izabela KOSTECKA, Walery JEZIERSKI

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Praca zawiera ocenę komfortu cieplnego w pomieszczeniach wybranego jednorodzinnego budynku mieszkalnego po jego termomodernizacji. Budynek usytuowany jest w Białymstoku przy ul. Cyprysowej i powstał w roku 1970. Termomodernizację budynku wykonano z uwzględnieniem wymagań ochrony cieplnej aktualnych dla roku 2012. Przedsięwzięcia termomodernizacyjne obejmowały dodatkowe ocieplenie ścian zewnętrznych, stropodachu, stropu nad piwnicą nieogrzewaną oraz wymianę okien, bez zmiany źródła ciepła. Termomodernizacja istotnie zmieniła warunki komfortu cieplnego w pomieszczeniach wybranego budynku. Na podstawie danych o parametrach mikroklimatu w budynku przeanalizowano warunki komfortu cieplnego. Do analizy zastosowano metodę oceny komfortu Fangera za pomocą wskaźników *PMV* i *PPD*. Wykryto istotną poprawę warunków komfortowych, co niejednoznacznie wpłynęło na zdrowie mieszkańców.

Słowa kluczowe: komfort cieplny, termomodernizacja, zapotrzebowanie na energię, wskaźniki komfortu, *PMV*, *PPD*.

1. Wprowadzenie

Przy określaniu warunków panujących w pomieszczeniach używa się zwykle dwóch pojęć: mikroklimat i komfort cieplny. Przez pojęcie mikroklimatu wewnątrz rozumie się zespół wszystkich parametrów fizycznych i chemicznych danego pomieszczenia, wywierający wpływ na organizm człowieka. Natomiast komfort cieplny określa warunki dobrego samopoczucia, to jest taki stan otoczenia, w którym jest zachowana równowaga cieplna organizmu ludzkiego (Klemm, 2005).

Odczuwanie ciepła lub zimna przez człowieka, czyli stopień obciążenia układu termoregulacyjnego organizmu, zależy od parametrów mikroklimatu. System regulacji termicznej człowieka, którego zadaniem jest utrzymywanie stałej temperatury ciała, wynoszącej około 37°C, oddziałuje na ilość ciepła oddawanego przez organizm poprzez promieniowanie, konwekcję, przewodzenie i odparowanie wilgoci. Ponadto, ilość oddawanego ciepła związana jest z wydatkiem energetycznym organizmu, a więc zależy od rodzaju wykonywanych czynności. Równocześnie straty ciepła organizmu zależą od izolacyjności cieplnej odzieży (Klemm, 2005; Śliwowski, 1999).

Środowisko termiczne, jest ważnym czynnikiem, wpływającym na samopoczucie człowieka, jego zdrowie, zdolność wykonywania pracy, a przede wszystkim na jego bezpieczeństwo. Istotne jest zapewnienie odpowiedniego komfortu cieplnego, czyli środowiska, w którym człowiek stosownie ubrany do panujących warunków i rodzaju

wykonywanej pracy nie odczuwa chłodu ani gorąca. Zachowany zostaje, zatem stan równowagi cieplnej organizmu.

Niestety często brakuje tego komfortu. W budynkach przez cały rok zmienia się temperatura razem ze zmianą pór roku. Klimatyczne warunki w kraju charakteryzują się chłodnymi zimami oraz gorącym latem. Stąd w słabo ocieplonych domach mogą występować duże wahania temperatury wewnętrznej w zależności od pory roku.

Po wykonaniu zabiegów termomodernizacyjnych w pomieszczeniach budynków zwykle oczekiwać można podwyższenia komfortu cieplnego. Związane jest to z tym, że przez elementy przegród budowlanych z podwyższonym oporem cieplnym traci się mniej ciepła, niż przez przegrody przed termomodernizacją. Następnym tego działania jest podwyższenie temperatury na powierzchni wewnętrznej ocieplonych przegród. Dodatkowo, temperatura w pomieszczeniach ulega mniejszym wahaniom w ciągu roku. Dlatego łatwiej jest zachować komfort cieplny. Oznacza to, że w ocieplonym budynku odzież może mieć niższą oporność cieplną. Przy niższej wartości wytwarzanej energii metabolicznej zachowane będzie odczucie komfortu cieplnego.

Celem pracy jest analiza komfortu cieplnego w pomieszczeniach wybranego jednorodzinnego budynku mieszkalnego, wzniesionego w roku 1970 na terenie Białymstoku, po wykonaniu termomodernizacji tego budynku w sierpniu-październiku 2009 roku. Termomodernizacja obejmowała dodatkowe ocieplenie

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: kowalewskigrzesiu@gmail.com

ścian zewnętrznych, stropodachu, stropu nad piwnicą nieogrzewaną oraz wymianę okien, bez zmiany źródła ciepła. Parametry cieplne przegród zostały dostosowane do wymagań aktualnych dla roku 2012.

2. Metody oceny warunków komfortu cieplnego

Środowisko przeznaczone na pobyt ludzi powinno być stworzone w taki sposób, aby przebywające w nim osoby nie czuły się ani za ciepło, ani za zimno. Powinno dążyć się do tego, aby odczucia kształtowały się w strefie, w której komfort jest zachowany. Najważniejszymi parametrami wpływającymi na stan komfortu cieplnego wnętrza są (Dylla, 2015):

- temperatura powietrza wewnętrznego t_i [°C],
- średnia temperatura promieniowania t_r [°C],
- prędkość przepływu powietrza v [m/s],
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej w pomieszczeniu p [Pa] lub [%],
- metabolizm ludzi w pomieszczeniu Q [W],
- opór przewodzenia ciepła przez odzież R_{ci} [clo].

Według norm, obowiązujących w wielu krajach, klasyfikacja stopnia komfortu cieplnego pomieszczeń została powiązana jedynie z temperaturą powietrza wewnętrznego. Do oceny komfortu uwzględnia się temperaturę wynikową t_M , czyli kombinację t_i oraz t_r . Według Missenarda (Dylla, 2015) wartość t_M określa się za pomocą wzoru:

$$t_M = \frac{h_c \cdot t_i + h_r \cdot t_r}{h_c + h_r} \quad (1)$$

gdzie h_c i h_r są współczynnikami przejmowania ciepła, odpowiednio przez konwekcję i promieniowanie w $W/m^2 \cdot K$.

Bardziej kompleksową ocenę zapewnia metoda van Zuilena (Dylla, 2015), wiążąca poziom komfortu z relacją czterech parametrów:

$$S = M + 0,25 \cdot (t_i + t_r) + 0,1 \cdot x - 0,1 \cdot (37,8 - t_i) \cdot \sqrt{v} \quad (2)$$

gdzie: t_i jest temperaturą powietrza wewnętrznego w °C, t_r jest średnią temperaturą promieniowania w °C, x jest zawartością pary wodnej w powietrzu w g/kg, v jest prędkością przepływu powietrza w m/s, M jest stałą (dla okresu grzewczego +9,2, a poza okresem grzewczym +10,6).

Do przeprowadzenia analizy komfortu cieplnego w niniejszym badaniu wykorzystano metodę Fanger (Fanger, 1974). Bazuje ona na zjawisku równowagi termicznej ludzkiego ciała. Komfort cieplny wyraża się za pomocą wskaźników PMV (*Predicted Mean Vote*) i PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*). Wskaźnik PMV charakteryzuje się w 7-stopniowej skali wrażenia cieplnego człowieka, natomiast wskaźnik PPD prezentuje procentowy udział osób niezadowolonych w powstałej równowadze cieplnej (Fanger, 1974). Pełne równanie pozwalające określić wskaźnik PMV wygląda następująco:

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036 M) + 0,028] \cdot \{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0,001 \cdot 4M(34 - t_i) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)4 - (t_r + 273)4] - f_{cl} \cdot h_{cl} (t_{cl} - t_i) \} \quad (3)$$

gdzie: M jest poziomem metabolizmu, który należy oszacować na podstawie aktywności osób przebywających w pomieszczeniu w W/m^2 , W jest pracą zewnętrzną w W/m^2 , p_a jest cząstkowym ciśnieniem pary wodnej w Pa, t_i jest temperaturą powietrza wewnętrznego w °C, t_r jest średnią temperaturą promieniowania w °C, t_{cl} jest temperaturą powierzchni odzieży w °C, f_{cl} jest stosunkiem pola powierzchni ciała odkrytego odzieży do pola powierzchni ciała odkrytego, h_{cl} jest współczynnikiem przejmowania ciepła przez konwekcję w $W/m^2 \cdot K$.

Temperaturę powierzchni odzieży wyznacza się w następujący sposób:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} (3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}) \cdot [(t_{cl} + 273)4 - (t_r + 273)4] + f_{cl} h_{cl} (t_{cl} - t_i) \quad (4)$$

gdzie I_{cl} jest oporem cieplnym odzieży w $m^2 \cdot K/W$.

Drugim istotnym wskaźnikiem zaproponowanym przez Fangera jest PPD , który określa przewidywany odsetek niezadowolonych z warunków cieplnych panujących w pomieszczeniu (Fanger, 1974). Wskaźnik ten jest związany zależnością ze wskaźnikiem PMV :

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-(0,0353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)] \quad (5)$$

Dla warunków komfortu cieplnego zaleca się, aby wskaźnik PMV mieścił się w zakresie: $-0,5 < PMV < +0,5$, co odpowiada $PPD < 10\%$ (Fanger, 1974).

Podsumowując przegląd metod, można stwierdzić, że zakres temperatury powietrza, w której człowiek czuje się dobrze, jest bardzo zróżnicowany. Zależy on od preferencji osobistych, ubrania, odżywienia, pory roku, wieku, a nawet płci. Na przykład, temperatury zapewniające dobre samopoczucie są zazwyczaj wyższe dla kobiet i osób starszych niż dla mężczyzn i osób młodszych. Ponadto, w wyższych temperaturach człowiek czuje się lepiej latem niż zimą.

3. Opis rozwiązania architektoniczno-budowlanego wybranego budynku mieszkalnego

Budynek usytuowany jest w Białymstoku przy ul. Cyprysowej. Wybudowano go w roku 1970, jako typowy dom jednorodzinny, wolnostojący. Teren, na którym znajduje się obiekt jest płaski. Najbliższe otoczenie budynku stanowią inne budynki mieszkalne nieoceniające go.

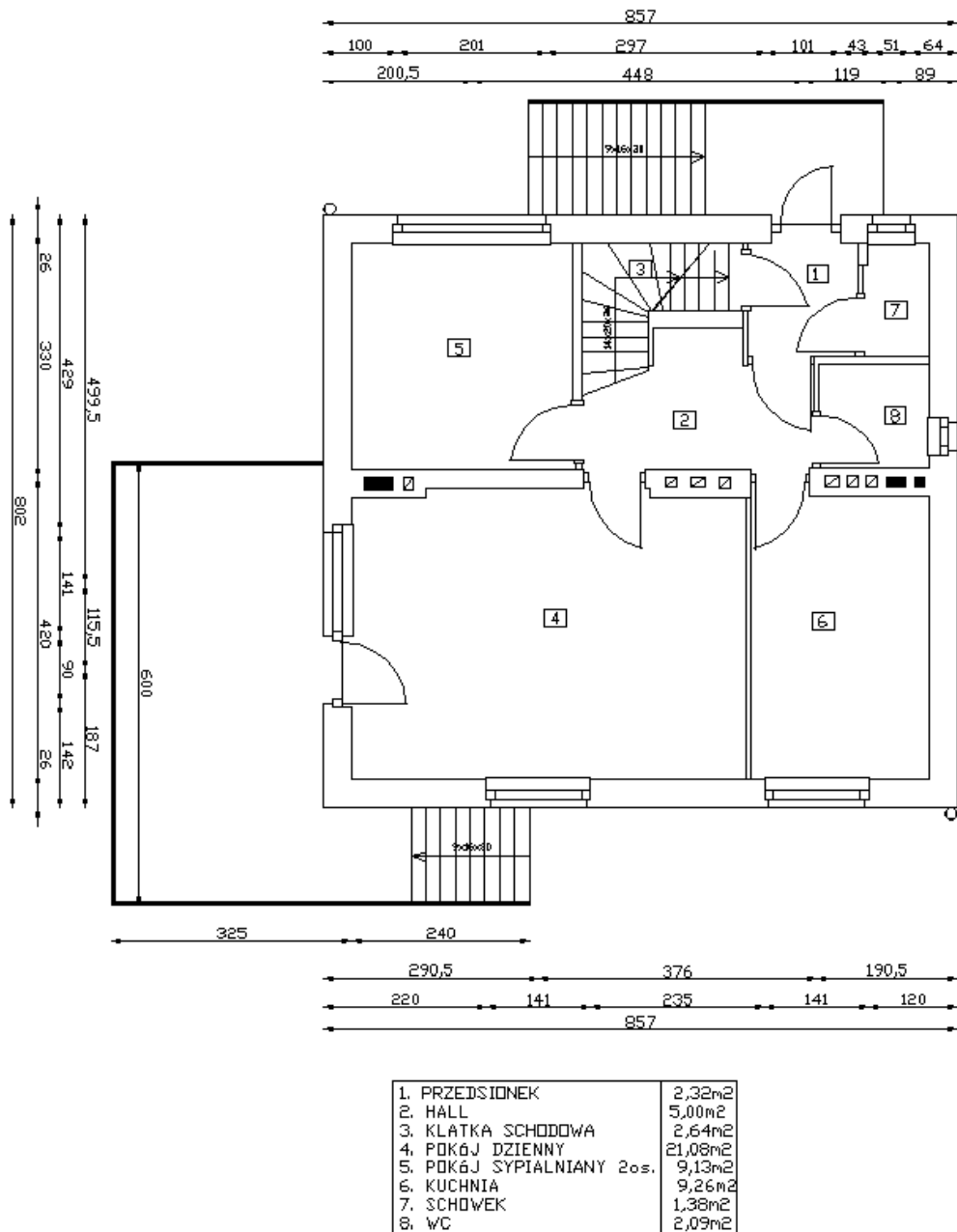
Rzut analizowanego budynku (rys. 1) ma wymiary bliskie kwadratu i wynoszące 857×802 cm. Budynek jest przeznaczony dla 8 osobowej rodziny. Jest on prostą bryłą o dwuspadowym płaskim dachu. Elewacja północna jest frontalną, usytuowano na niej 4 okna i wejście główne.

Wykończenie ścian budynku zostało wykonane z tynku wapienno-cementowego w kolorze beżowym. Cokoły są wykonane z tynku cementowego.

Na parterze zaprojektowano część dzienną: pokój sypialniany, kuchnię oraz WC. Powierzchnie pomieszczeń podano na rysunku 2. Na poddaszu znajdują się trzy sypialnie i łazienka. Wysokość parteru i poddasza wynosi 2,5 m. Budynek jest podpiwniczony. Wysokość piwnicy wynosi 2,20 m. W piwnicy znajduje się garaż, kotłownia ze źródłem centralnego ogrzewania (kocioł gazowy), pomieszczenie gospodarcze, a także pralnia.



Rys. 1. Elewacja północna



Rys. 2. Rzut parteru analizowanego budynku

Rozwiązania konstrukcyjne budynku podano na rysunku 3. Konstrukcja ścian zewnętrznych przed termomodernizacją składała się z muru ceglanego z cegły kratówki grubości 38 cm oraz warstwy tynku cementowo-wapiennego od wewnątrz i od zewnątrz grubości 1,5 cm. Podczas termomodernizacji ściany zewnętrzne zostały ocieplone od strony zewnętrznej z wykorzystaniem metody lekkiej mokrej. Płyty termoizolacyjne przyklejono do ściany masą klejącą. Jako materiał izolacyjny użyto srebrnoszarego styropianu z uszlachetnioną kompozycją grafitu, którego współczynnik przewodzenia ciepła wynosi $\lambda = 0,031 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (PN-EN ISO 6946:1999 *Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania*). Grubość warstwy styropianu przyjęto 15 cm. Oznacza to, że według obliczeń autorów współczynnik przenikania ciepła po zastosowaniu dodatkowej termoizolacji tych ścian zmienił się od $U = 1,14 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ do $U = 0,24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

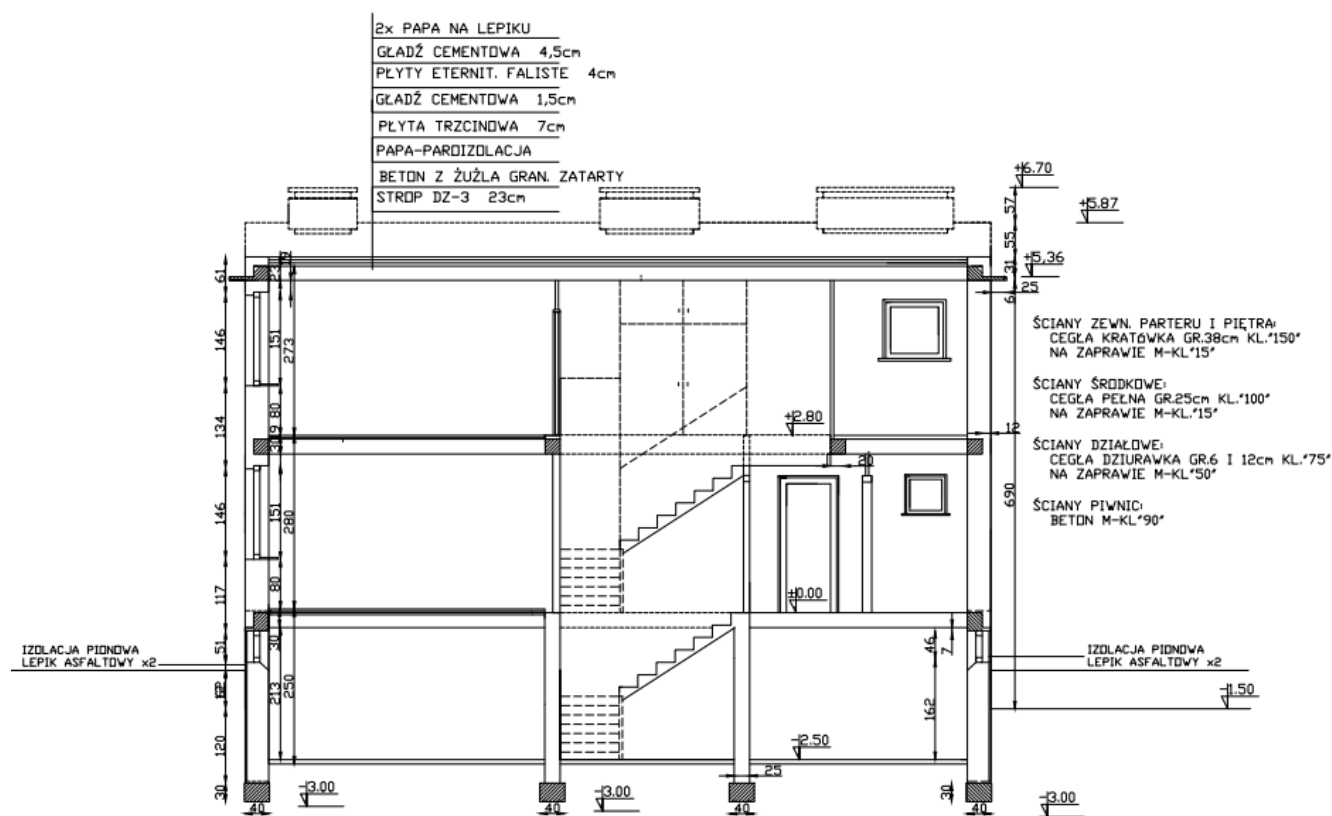
Termomodernizację stropodachu przeprowadzono dwuwarstwowym zestawem niepalnej izolacji termicznej do dachów płaskich składającym się z płyt wełny mineralnej szklanej, stosowanych pod bezpośrednie krycie papą. System dwuwarstwowy pozwalał na wyeliminowanie liniowych mostków termicznych na stykach płyt. Do izolacji termicznej użyto zestawu płyt z twardej wełny mineralnej o współczynniku

$\lambda = 0,038 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ grubości 15 cm. W wyniku ich zastosowania współczynnik przenikania ciepła zmalał od $U = 0,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ do $U = 0,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Do izolacji termicznej stropu nad piwnicą zastosowano płyty ze skalnej wełny mineralnej. Izolację termiczną umieszczano na spodniej powierzchni stropu powodując w ten sposób ograniczenie wpływu mostków termicznych w miejscach jego styku ze ścianami. Niepalne płyty z wełny mineralnej o współczynniku $\lambda = 0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, grubości 5 cm mocowane są za pomocą zapraw klejących. Rolę warstwy wykończeniowej pełni zaprawa cementowa. Współczynnik przenikania ciepła po dociepleniu zmienił się od $U = 0,88 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ do $U = 0,39 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Współczynnik przenikania ciepła wymienionego okna jednoskrzydłowego rozwierano-uchylanego o wymiarach 1230×1480 mm z szybą standardową według danych producenta wynosi $U = 1,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Wcześniej zamontowane okna według przybliżonej oceny miały $U = 1,80 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

W budynku wbudowano wentylację grawitacyjną kanałową. Kanały o wymiarach 14×14 cm i 14×20 cm umieszczono w ścianach wewnętrznych. Grubość ścian w miejscu kanałów wentylacyjnych wynosi 38 cm. System wentylacji podczas termomodernizacji nie uległ zmianie. Również nie uległ zmianie sprawnie działający kocioł gazowy.



Rys. 3. Charakterystyczny przekrój pionowy analizowanego budynku

Przed rozpoczęciem robót termomodernizacyjnych (styczeń 2009 roku) przeprowadzono pomiary parametrów charakteryzujących mikroklimat w wybranych pomieszczeniach rozpatrywanego budynku, a mianowicie temperatury powietrza wewnętrznego, wilgotności względnej oraz prędkości ruchu powietrza. Po realizacji w roku 2009 opisanych wyżej przedsięwzięć termomodernizacyjnych analizowany budynek był eksploatowany w ciągu 3 lat przed ponownym przeprowadzeniem pomiarów parametrów mikroklimatu i oceną komfortu cieplnego w jego pomieszczeniach. Taki okres pozwoli na wyschnięcie elementów przegród budowlanych po zakończeniu działań termomodernizacyjnych oraz osiągnięcie ustabilizowanego stanu wilgotności.

4. Wyniki pomiarów parametrów mikroklimatu oraz analiza warunków komfortu cieplnego

W styczniu 2012 roku wykonano badanie parametrów mikroklimatu w pomieszczeniach rozpatrywanego budynku. Temperaturę powietrza mierzono przy pomocy termometru cieczowego. Średnią temperaturę na wewnętrznej powierzchni ścian zmierzono termometrem termoelektrycznym. Pomiar wilgotności względnej powietrza dokonano za pomocą psychrometru Assmana. Dla każdego z parametrów dokonano po 10 pomiarów w każdym z trzech pomieszczeń rozpatrywanego budynku. Wyniki pomiarów zostały uśrednione najpierw dla każdego z pomieszczeń a potem dla całego budynku. Średnie wartości tych parametrów dla

całego budynku przed i po termomodernizacji w celu porównania zestawiono w tabeli 1.

Jak wynika z tabeli 1, podstawowe parametry mikroklimatu po termomodernizacji zostały istotnie zmienione. Temperatura powietrza wewnętrznego wzrosła o 22,2%; temperatura na powierzchni wewnętrznej ścian zewnętrznych wzrosła o 31,0%; wilgotność względna powietrza wewnętrznego zwiększyła się o 25%. W wyniku tych zmian mieszkańcy narzekali na odczucie duszności i zbyt ciepłego powietrza w pomieszczeniach. Na zlecenie właściciela powstała konieczność sprawdzenia warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach rozpatrywanego budynku.

W pierwszym etapie przeanalizowano możliwe efekty wpływu każdego z parametrów w tabeli 1 na wskaźnik komfortu PMV . W tym celu wykorzystano zależności graficzne tego wskaźnika od każdego z trzech badanych parametrów mikroklimatu. Jako pierwszy parametr przeanalizowano wpływ temperatury powietrza wewnętrznego. Wstępnie na podstawie obliczeń wskaźnika przy zmianie t_i od 10°C do 26°C opracowano wykres zależności $PMV = f(t_i)$ (rys. 4). Pozostałe parametry niezbędne do wykonania obliczeń PMV (metabolizm, praca zewnętrzna, oporność cieplna odzieży, prędkość przepływu powietrza, stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego, temperatura powierzchni odzieży) przyjęto jako stałe, uśrednione i charakterystyczne dla pomieszczeń budynków mieszkalnych. Wartości tych parametrów podano w tabeli 2.

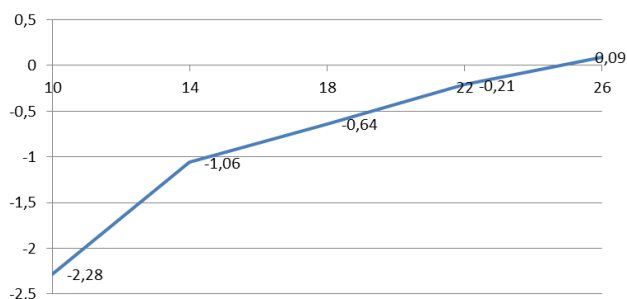
Tab. 1. Zestawienie wyników pomiarów parametrów mikroklimatu w rozpatrywanym budynku

Numer	Parametry mikroklimatu	Przed termomodernizacją (w roku 2009)	Po termomodernizacji (w roku 2012)
1	Temperatura powietrza wewnętrznego, [°C]	18,5	22,6
2	Wilgotność względna powietrza wewnętrznego, [%]	38	63
3	Temperatura na powierzchni wewnętrznej ścian zewnętrznych [°C]	15,5	20,3

Tab. 2. Zestawienie danych wejściowych do obliczeń programem MIKROKLIMAT

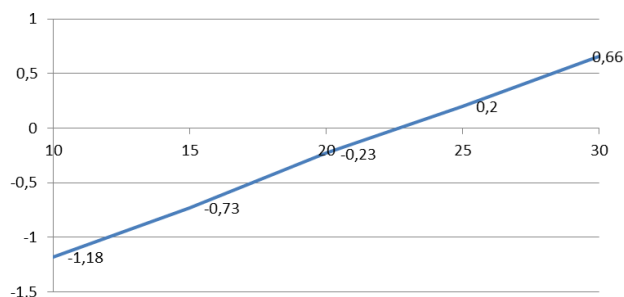
Czynniki komfortu cieplnego		Przed termomodernizacją	Po termomodernizacji
Metabolizm	W/m ²	70	70
		wypoczynek w pozycji stojącej, aktywność niewielka w pozycji siedzącej	wypoczynek w pozycji stojącej, aktywność niewielka w pozycji siedzącej
Praca zewnętrzna	W/m ²	20	10
		wykonywane niewielkie czynności	wykonywane drobne czynności
Oporność cieplna odzieży	m ² ·°C/W	0,23	0,16
		odzież europejska: bielizna bawełniana z długimi rękawkami i nogawkami, koszula, garnitur, wełniane skarpety i buty	odzież zimowa: bielizna, koszula z długimi rękawkami, spodnie, marynarka lub sweter z długimi rękawkami, grube skarpety i półbuty
Temperatura powietrza	°C	18,5	22,6
Średnia temperatura promieniowania	°C	15,5	20,3
Prędkość przepływu powietrza	m/s	0,08	0,035
Ciśnienie pary wodnej	Pa	810,2	1728,7

Korzystając z rysunku 4 stwierdzono, że zmiana temperatury powietrza istotnie wpływa na wskaźnik *PMV*. Wahania wskaźnika *PMV* najbardziej widać przy wartościach t_i od 10°C do 14°C, potem zależność ta słabnie. Zmierzone temperatury w analizowanym budynku wskazywały, że przy temperaturze przed termomodernizacją (18,5°C) występowały warunki poniżej dolnej granicy komfortu. Natomiast przy temperaturze po termomodernizacji (22,6°C) został zapewniony komfort cieplny w pomieszczeniu, graniczne wartości, którego mieszczą się w zakresie temperatur t_i od 19,5°C do 26°C.



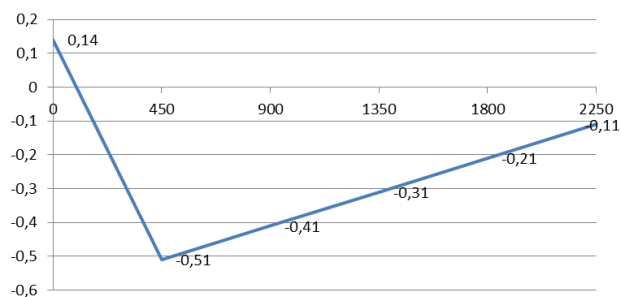
Rys. 4. Zależność *PMV* od temperatury powietrza wewnętrznego t_i , °C

Następnie przeanalizowano wpływ temperatury na powierzchni wewnętrznej ścian zewnętrznych t_r [°C] na *PMV*. Na opracowanym wykresie (rys. 5) zależności $PMV = f(t_r)$ wykazano, że zmiana temperatury promieniowania również istotnie wpływa na wskaźnik *PMV*. Komfort cieplny osiągnięty jest w temperaturach t_r od 18,5°C do 27°C. Oznacza to, że przy temperaturze t_r przed termomodernizacją (15,5°C) występowały warunki poniżej granicy komfortu. Natomiast przy podwyższeniu temperatury t_r po termomodernizacji (20,3°C) został zapewniony komfort cieplny.



Rys. 5. Zależność *PMV* od średniej temperatury promieniowania t_r , °C

Dalej przeanalizowano wpływ ciśnienia pary wodnej p [Pa] na wskaźnik *PMV*. W tym celu, wykorzystując dane z tabeli 1, wyliczono wartości ciśnienia pary wodnej p w pomieszczeniu przed i po termomodernizacji, które wynosiły odpowiednio $p_0 = 808,86$ Pa oraz $p_t = 1726,58$ Pa. Z rysunku 6 można odczytać, że obie wartości wskaźnika *PMV* zapewniają komfort cieplny.



Rys. 6. Zależność *PMV* od ciśnienia pary wodnej p , Pa

Jak wynika z przeprowadzonej analizy wpływu poszczególnych czynników, warunki komfortowe w pomieszczeniach budynku wyraźnie się poprawiły. Narzekanie mieszkańców na duszność oraz życzenie właściciela zdeterminowały kontynuację badań poprzez wykonanie kompleksowej oceny komfortu przy jednoczesnym uwzględnieniu całego zespołu czynników. Przy czym została podjęta decyzja o wykonaniu obliczeń wskaźnika *PMV* dla budynku przed i po termomodernizacji.

Do obliczeń zostały sprecyzowane wartości wszystkich parametrów w analizowanym budynku, od których zależy wskaźnik *PMV*. Dokonano obliczeń wskaźnika *PMV* przy podanych niżej parametrach:

- metabolizm 70 W/m² (wypoczynek w pozycji stojącej, aktywność niewielka w pozycji siedzącej),
- praca zewnętrzna 10 W/m² (wykonywane niewielkie czynności),
- oporność cieplna odzieży 0,16 m²·°C/W (odzież zimowa: bielizna, koszula z długimi rękawkami, spodnie, marynarka lub sweter z długimi rękawkami, grube skarpety i półbuty),
- prędkość przepływu powietrza 0,035 m/s,
- ciśnienie pary wodnej 1728,7 Pa.

W tabeli 2 podano wartości tych parametrów przed i po termomodernizacji.

Wyniki obliczeń, przedstawione w tabeli 3, pozwoliły ustalić, że przed termomodernizacją w pomieszczeniach mieszkalnych analizowanego budynku panowały niekomfortowe warunki. O tym świadczy wartość wskaźnika *PMV* wynosząca -0,97, co przekracza dolną granicę komfortu -0,5. Wrażenia cieplne mieszkańców w siedmiostopniowej skali ocen kształtowały się na poziomie „dość chłodno”, a przewidywany odsetek osób niezadowolonych sięga prawie 25%, co przekracza wartość graniczną określoną dla warunków komfortu cieplnego.

Po przeprowadzeniu termomodernizacji budynku wskaźnik *PMV* okazał się równy +0,23 i mieścił się w granicach komfortu (-0,5 ÷ +0,5). Odczucia cieplne określone przy pomocy siedmiostopniowej skali opisuje się na poziomie „obojętnie-dość ciepło”. Przewidywany odsetek niezadowolonych, równy 6,1%, mieści się w granicach zakresu warunków komfortu cieplnego i nie przekracza 10%.

Tab. 3. Wyniki obliczeń wygenerowane za pomocą programu MIKROKLIMAT

Wyniki		Przed termomodernizacją	Po termomodernizacji
Stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego	f_{cl}	1,198	1,153
Temperatura powierzchni odzieży, °C	t_{cl}	22,65	26,60
Przewidywana średnia ocena	PMV	-0,97	+0,23
Przewidywany odsetek niezadowolonych, %	PPD	24,9	6,1

Badanie potwierdziło poprawę warunków komfortu w pomieszczeniach rozpatrywanego budynku. Jednak nie pozwoliło wyjaśnić przyczyny narzekania mieszkańców. Zauważono, że w pomieszczeniach budynku po termomodernizacji istotnie spadła prędkość przepływu powietrza. Po przeanalizowaniu systemu wentylacji w budynku oraz właściwości zastosowanej stolarki okiennej wykryto, że w budynku brakuje świeżego powietrza, a zanieczyszczone powietrze jest nieefektywnie usuwane na zewnątrz. Przebieg strumienia powietrza utrudniła nowa szczelna stolarka. To odbiło się na prawie dwukrotnym obniżeniu prędkości przepływu powietrza i doprowadziło do podwyższenia wilgotności względnej oraz stężenia zanieczyszczeń w powietrzu. Mieszkańcy zareagowali narzekaniem na odczucie duszności. Właścicielowi zaproponowano usprawnienie dopływu świeżego powietrza, na przykład poprzez zastosowanie nawiewników okiennych, w celu zapewnienia efektywnej wentylacji w pomieszczeniach budynku.

5. Wnioski

- Po analizie warunków komfortu w budynku poddanym termomodernizacji stwierdzono istotną poprawę wskaźników komfortu. Wskaźnik PMV wzrósł z -0,97 do +0,23, a wskaźnik PPD obniżył się z 24,9% do 6,1%. Nowe wartości wskaźników mieściły się w zalecanym zakresie $-0,5 < PMV < +0,5$ oraz $PPD < 10\%$.
- Zastosowanie nowej szczelnej stolarki okiennej obniżyło efektywność wentylacji, co odbiło się na prawie dwukrotnym obniżeniu prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniach. Doprowadziło to do podwyższenia wilgotności względnej i stężenia zanieczyszczeń w powietrzu oraz odczucia duszności u mieszkańców.
- W celu poprawy sytuacji zalecano usprawnienie dopływu świeżego powietrza do zapewnienia efektywnej wentylacji w budynku poprzez zastosowanie nawiewników okiennych.

Literatura

- Dylla A. (2015). Fizyka ciepła budowli w praktyce. Wydawnictwo PWN, Warszawa.
- Fanger P.O. (1974). Komfort cieplny. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Klemm P. (2005). Budownictwo ogólne. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Śliwowski L. (1999). Mikroklimat wnętrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

ASSESSMENT OF THERMAL COMFORT IN THE SINGLE-FAMILY RESIDENTIAL BUILDING AFTER ITS THERMAL-MODERNISATION

Abstract: The paper contains an assessment of the indoor thermal comfort in a single-family residential building after its thermal-modernisation. The building established in 1970 is located in Białystok at Cyprysowa street. Thermo-modernisation of the building was made according to the current requirements of thermal protection in year 2012. The thermo-modernization projects included additional insulation of external walls, ceiling over unheated basement and replacement of windows, without change of heat source. Thermo-modernisation significantly changed the indoor comfort conditions in the building. Based on the data on the microclimate parameters in the building, the conditions of thermal comfort were analysed. The Fanger comfort assessment method using PMV and PPD indicators were used in the analysis. Significant improvements in comfort conditions were identified, which affected ambiguously the health of the inhabitants.

ANALIZA PRZEWIETRZANIA I WENTYLACJI MIASTA BIAŁEGOSTOKU

Kamil RAWSKI*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W miastach o słabej wentylacji zauważyć można tendencję do nadmiernego gromadzenia się zanieczyszczeń w powietrzu. W artykule przeanalizowano teren miasta Białegostoku pod kątem dynamiki mas powietrza, aby sprawdzić czy jest odpowiednio przewietrzane. Analizy oparte zostały na podstawie zdjęć lotniczych miasta, dzięki czemu wyszczególniono następujące tereny: z dominacją procesów regeneracji powietrza, przewietrzających i regenerujących powietrze, dynamizujących wymianę powietrza, z dominującym procesem przewietrzania, z przeważającą stagnacją powietrza oraz te, które utrudniają wymianę powietrza. Poruszone zostały również zagadnienia związane z planowaniem przestrzennym mającym na celu polepszenie funkcji przewietrzających miasta.

Słowa kluczowe: planowanie przestrzenne, dynamika mas powietrza, wentylacja, korytarze przewietrzające.

1. Wprowadzenie

W dobie nadmiernej urbanizacji coraz częściej przekraczane zostają normy z zakresu ochrony czystości powietrza, co w przypadku niekorzystnych zjawisk atmosferycznych może objawić się jako smog. Istnieje wiele czynników odpowiedzialnych za dany stan rzeczy w zespołach miejskich. Wśród nich można wymienić ukształtowanie terenu czy klimat, a także wszelkiego rodzaju źródła emisji zanieczyszczeń powietrza oraz planowanie przestrzenne. W niniejszym artykule poruszone zostaną kwestie związane przede wszystkim z ostatnim czynnikiem, ponieważ poprzez kształtowanie przestrzeni w odpowiedni sposób można wpłynąć na ruch mas powietrza, a co za tym idzie – zmniejszyć niekorzystny wpływ pozostałych czynników.

Zjawiska, które źle oddziałują na dynamikę powietrza w obrębie tkanki miejskiej przyczyniają się do jego stagnowania. W przeciwieństwie do planowania przestrzennego, aspekty związane z ukształtowaniem terenu niezależne są od działalności człowieka. Obszary położone w zagłębieniach, bądź też otoczone znacznymi wzniesieniami, będą miały ograniczony przepływ powietrza. Istotną kwestią jest również kierunek napływu mas powietrza. Oczywiście niekorzystnym zjawiskiem w tym przypadku są przeważające wiatry znad terenów zanieczyszczonych w kierunku wysokiej zabudowy (Ng, 2008). Bardzo korzystne są natomiast obszary mające dużą zdolność regeneracji powietrza, jak na przykład tereny leśne.

Podczas planowania przestrzennego miasta powinno uwzględniać się powyższe czynniki, tak aby wentylacja

była utrzymywana na odpowiednim poziomie. Takie działanie wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju, która zakłada iż bieżący rozwój powinien uwzględniać potrzeby przyszłych pokoleń, a nie odbywać się ich kosztem (Zaręba, 2012).

2. Charakterystyka ukształtowania i warunków klimatycznych miasta Białegostoku

W celu przeprowadzenia analizy przewietrzania miasta Białegostoku zaznajomiono się z ukształtowaniem jego terenu oraz podstawowymi warunkami klimatycznymi. Informacje te można znaleźć w opracowaniu Ekofizjografia Białegostoku (Kwiatkowski i Gajko, 2011 i 2012), gdzie scharakteryzowano środowisko przyrodnicze miasta. Powołując się na regionalizację klimatologiczną województwa Podlaskiego przedstawioną przez Górniaka (2000), zakwalifikowano Białystok do podlaskiego regionu klimatycznego, w subregionie białostockim. Klimat miasta opisano jako umiarkowany, przejściowy o zwiększonych wpływach kontynentalizmu. Okres letni z dużą ilością dni słonecznych dynamizuje pionowy ruch mas powietrza, co przyczynia się do polepszenia jego jakości.

Ważna z punktu widzenia analiz jest charakterystyka występujących na danym obszarze wiatrów. Dominują wiatry zachodnie oraz południowo-zachodnie i południowo-wschodnie (Bartocha i in., 2008). W ponad połowie przypadków (54%) osiągają one prędkość 1-3 m/s, co klasyfikuje je jako słabe. Kolejnym ważnym aspektem jest ukształtowanie powierzchni miasta. Obszar

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: k.rawski@pb.edu.pl

Białegostoku stanowi część rozległej wysoczyzny morenowej, uformowanej podczas stadiału środkowego zlodowacenia Warty. Na podstawie mapy hipsometrycznej miasta (Kwiatkowski i Gajko, 2011) wywnioskowano, iż lokalne obniżenia terenu powiązane są z doliną rzeki Białej. Ogólnie można również przyjąć, że teren stopniowo obniża się w kierunku północno-zachodnim. Najniżej położony punkt znajduje się w dolinie rzeki Narwi. W północno-wschodniej części miasta znajdują się wysoczyzny moreny czołowej wznoszące się na wysokość 150-175 metrów nad poziomem morza. Moreny czołowe odznaczają się tam wyraźną asymetrią zboczy. Od strony południowo-zachodniej zbocza mają łagodne nachylenie, zaś od strony północno-wschodniej są bardzo strome (Kwiatkowski i Gajko, 2011). Zwrócono również uwagę na tereny zieleni przylegające do granic miasta, a także na te, które zaczynają się w obrębie miasta i mają swoją kontynuację poza jego obszarem, w szczególności Las Pietrasze, Las Antonik, Las Zwierzyniecki, Las Turczyński, Las Bacieczki oraz Las Bagno. Warto również odnotować obecność Puszczy Knyszyńskiej w północno-wschodnim sąsiedztwie Białegostoku.

3. Wymiana mas powietrza

3.1. Procesy wymiany powietrza

W celu określenia systemu wymiany powietrza scharakteryzowano następujące procesy (Szulcewska i in., 2009):

- Wymianę poziomą mas powietrza – czyli rozkład wiatrów w nawiązaniu do układu rzeźby terenu i rodzaju zagospodarowania. Dogodnymi terenami do zajścia owego procesu są głównie dna dolin o niewielkiej szorstkości podłoża, czyli z niewielkim udziałem roślinności wysokiej lub zabudowy oraz tereny komunikacji kolejowej, gdzie nie występują zabudowania. Takie kanały przewietrzające umożliwiają sprawne przemieszczanie się powietrza, zwłaszcza w obrębie zwartej zabudowy miejskiej.
- Wymianę pionową mas powietrza – która umożliwia konwekcyjną (pionową) wymianę powietrza. Proces ten zachodzi szczególnie na terenach o ograniczonej poziomej wymianie powietrza, takich jak: zagłębienia, polany śródlądne czy tereny intensywnej zabudowy. Konwekcja może być ograniczona (zaburzone stosunki wymiany powietrza) jeśli na danym obszarze brakuje terenów zieleni dynamizujących pionową wymianę powietrza, zwłaszcza w sąsiedztwie znacznych powierzchni pokrytych nawierzchniami nieprzepuszczalnymi. Określając warunki pionowej wymiany mas powietrza istotna jest liczba dni z ciszą, w których wymiana pozioma jest ograniczona.
- Strefę zasilania klimatycznego – są to stosunkowo duże obszary terenów otwartych położone zgodnie z dominującym kierunkiem wiatrów. Strefa ta zależna jest przede wszystkim od stanu czystości, a także od układu terenów otwartych, ich szerokości oraz

powiązań z kanałami przewietrzającymi. Jej głównym zadaniem jest poprawa poziomej wymiany powietrza. Powyższe procesy mają również bezpośrednie odniesienie w przypadku analizy dynamiki mas powietrza przeprowadzanej dla miasta Białegostoku. Ruch wiatrów w śródmieściu podlega zjawisku bryzy miejskiej. Na jego miejską bryzę składają się dwa strumienie powietrza. Jeden sprowadza do miasta powietrze z otaczających terenów, co przyczynia się do lepszego przewietrzania miasta. Natomiast drugi – dolny strumień – stanowi prąd odwrotny i nakłada się na cyrkulację skierowaną do wnętrza miasta, co nazywa się zjawiskiem „antybryzy” (Kwiatkowski i Gajko, 2011).

3.2. Klasyfikacja terenów ze względu na funkcję wymiany powietrza

Kwiatkowski i Gajko (2012) wyróżnili dla obszaru miasta Białegostoku następujące kategorie terenów o różnych funkcjach wymiany powietrza:

- Tereny z dominacją procesu regeneracji powietrza – są to przede wszystkim rozległe płaty lasów. Najważniejszymi spośród tak zwanych funkcji pozaprodukcyjnych lasów są funkcje: ochronna i bioklimatyczna. Kompleksy leśne mają największe znaczenie w produkcji tlenu i odświeżania powietrza.
- Tereny regeneracji powietrza i przewietrzania – cechuje je mniejsza intensywność regeneracji, jednocześnie proces przewietrzania zyskuje na znaczeniu. Są to głównie tereny otwarte pokryte trwałą roślinnością o niewielkiej szorstkości podłoża. Wraz z dolinami rzecznyymi i terenami o rozproszonej zabudowie jednorodzinnej sprzyjają powstawaniu klinów i pasm przewietrzalności. Tereny te mogą pełnić funkcję regeneracji powietrza dzięki częściowemu pokryciu drzewami i zaroślami.
- Tereny z dominującym procesem przewietrzania – na terenach o małej szorstkości podłoża proces przewietrzania jest kluczowy. Z powodu braku trwałej pokrywy roślinnej lub występowaniem jej jedynie sezonowo, funkcja regeneracji powietrza traci na znaczeniu.
- Tereny z dominacją procesu stagnacji powietrza – są to obniżone, nieckowate formy terenu i płaskie fragmenty dolin rzecznych. Na terenach zabudowanych obszary te cechuje ograniczenie wymiany poziomej powietrza, jednak wzrasta ich rola jako terenów kontrastowych termicznie. Natomiast ich znaczenie w kontekście wymiany powietrza zanika na terenach otwartych.
- Tereny utrudniające przewietrzanie – główną przeszkodą dla przepływu powietrza są elementy wnętrza krajobrazowych oraz urbanistycznych tworzących ścianę konkretną. Dlatego obszary o znacznej szorstkości podłoża oraz wyższym stopniu zwartości zabudowy utrudniają ten proces klimatyczny, który w skali miasta jest najbardziej pożądanym.
- Tereny dynamizujące wymianę powietrza – są to tereny kontrastowe termicznie, dynamizujące

wymianę konwekcyjną powietrza. Dzięki temu cyrkulacja powietrza może ulec poprawie również wśród zwartej zabudowy. Do takich powierzchni zaliczyć można tereny zieleni i wód otwartych otoczone zabudową. Im większe pokrycie terenu roślinnością wyższą oraz wodą, tym większa siła oddziaływania.

4. Planowanie przestrzenne

Znając procesy wymiany powietrza oraz charakterystykę terenów, na których one zachodzą, można poprzez planowanie przestrzenne objąć ochroną korzystne obszary oraz przyczynić się do powstania nowych. W celu wykrycia takich miejsc przydatna może okazać się metoda odwzorowywania szorstkości miejskich powierzchni, która bazuje na bazie danych przestrzennych modeli budynków (Gál i Unger, 2008). Ważnym aspektem jest zachowanie sieci klinów i korytarzy przewietrzających, a także rozwijanie jej z uwzględnieniem dominujących kierunków wiatru. Praktykę taką można zauważyć w Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Białegostoku, gdzie kładzie się nacisk na zachowanie oraz rozwój terenów będących systemem przyrodniczym miasta (rys. 1). Oprócz struktury przyrodniczej, tworzą one zarazem kliny przewietrzające ze zdolnościami regeneracyjnymi, dzięki czemu wspomagają procesy wymiany mas powietrza. Takie działanie jest bardzo istotne z punktu widzenia utrzymania wentylacji miasta na optymalnym poziomie.

Przytoczone wcześniej zjawisko bryzy miejskiej, wywołane jest efektem miejskiej wyspy ciepła. Ciepłe powietrze znad terenów silnie zurbanizowanych ulatnia się i zastępowane jest chłodniejszym powietrzem znad terenów podmiejskich, dzięki czemu zachodzi jego cyrkulacja (Su i in., 2016). Innym decydującym czynnikiem mającym wpływ na siłę procesów przewietrzania jest układ budynków oraz arterii komunikacyjnych. Planując przestrzeń w odpowiedni sposób można zatem wywrzeć korzystny wpływ na jakość powietrza w mieście lub w przeciwnym razie, obniżyć ją. Obecność zabudowy w zależności od jej konfiguracji w znacznym stopniu zaburza przepływ powietrza i ma bardzo złożony charakter (Ng, 2008; Gnatowska, 2013; Zielonko-Jung, 2014). Wyróżnić można trzy główne efekty kształtujące wiatr (Laskowski, 1987):

- efekt próżni – powstaje przy wypływie powietrza z gęsto zabudowanego obszaru do otwartej przestrzeni; powstają lokalne zawirowania i spadek prędkości powietrza;
- efekt dyszy – powstaje w przypadku dwóch szeregów budynków sukcesywnie zbliżających się do siebie – siła wiatru stopniowo wzrasta lub maleje (w zależności od kierunku wiania);
- efekt zmiany kierunku – powstaje gdy powietrze napotyka przeszkodę i gwałtownie hamuje; pod wpływem ciśnienia zostaje zassane, co powoduje lokalne zawirowania i wzrost prędkości wiatru.

W zależności od nakładania się na siebie poszczególnych

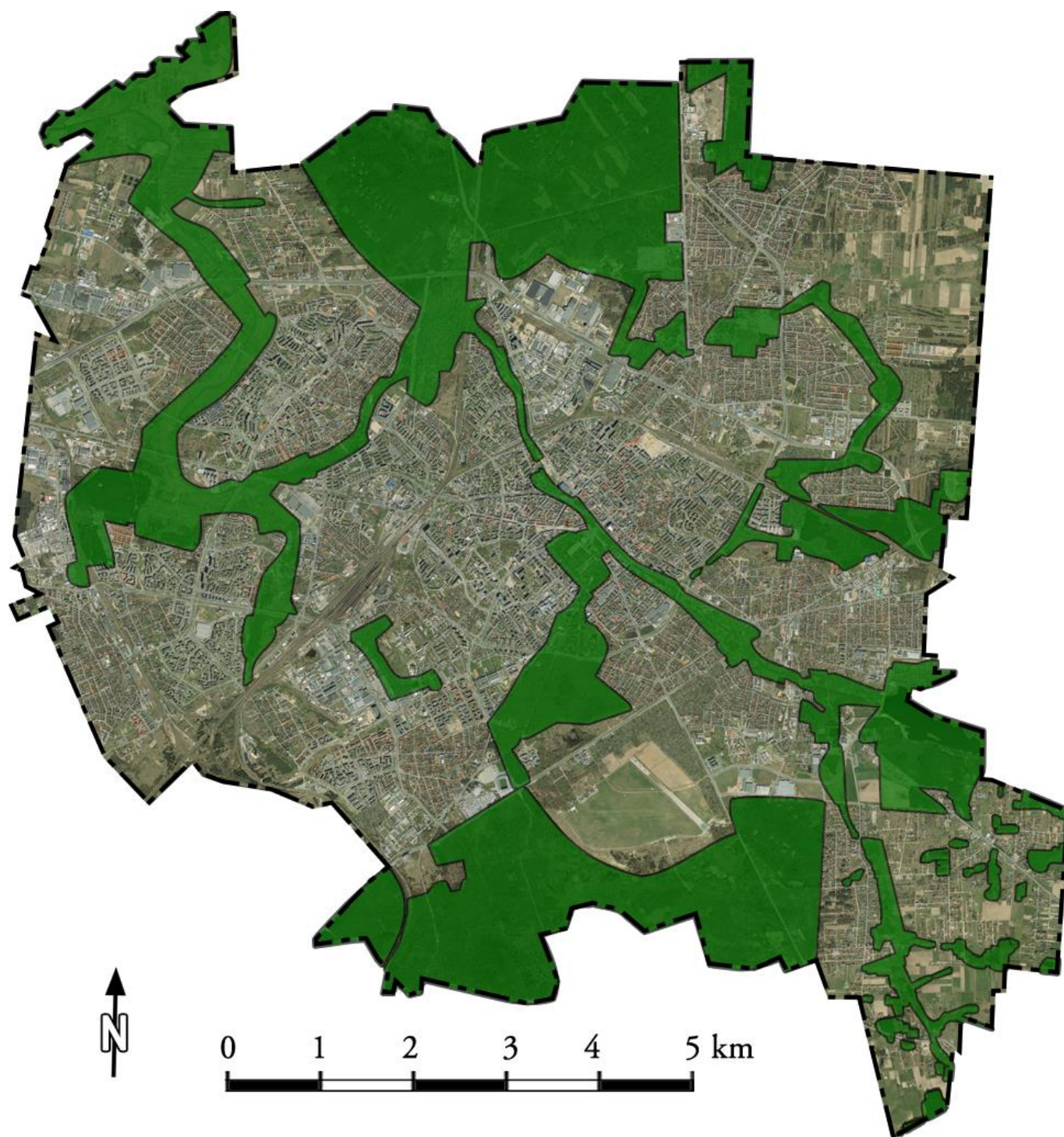
efektów, powietrze może stagnować lub też objawiać się w postaci silnych wiatrów. Optymalnym rozwiązaniem jest eliminowanie lokalnych stref dużej prędkości, nie zakłócając przy tym swobodnego przepływu mas powietrza przez miasto. Najlepiej, aby zanieczyszczone powietrze trafiało nad tereny o wysokich zdolnościach regeneracyjnych. W tym celu konieczna jest integracja systemów zieleni miejskiej i pozamiejskiej z dominującymi kierunkami wiatrów.

Amado i in. (2016) opisują szereg kryteriów do przekształcania miejsc, które mogłyby znacznie poprawić wentylację, lecz w wyniku niekontrolowanego rozrostu miast oddziałują wręcz przeciwnie. Przyczyny takiego stanu rzeczy wskazują Huchzermeyer i Karam (2006), którzy twierdzą, iż problem taki występuje głównie na terenach, gdzie rozwój zachodzi nierównomiernie ze względu na ograniczenia wywołane migracjami na dużą skalę. Ma to przełożenie na destabilizację polityczną i w konsekwencji w dużej mierze wpływa na nieformalny rozwój miasta.

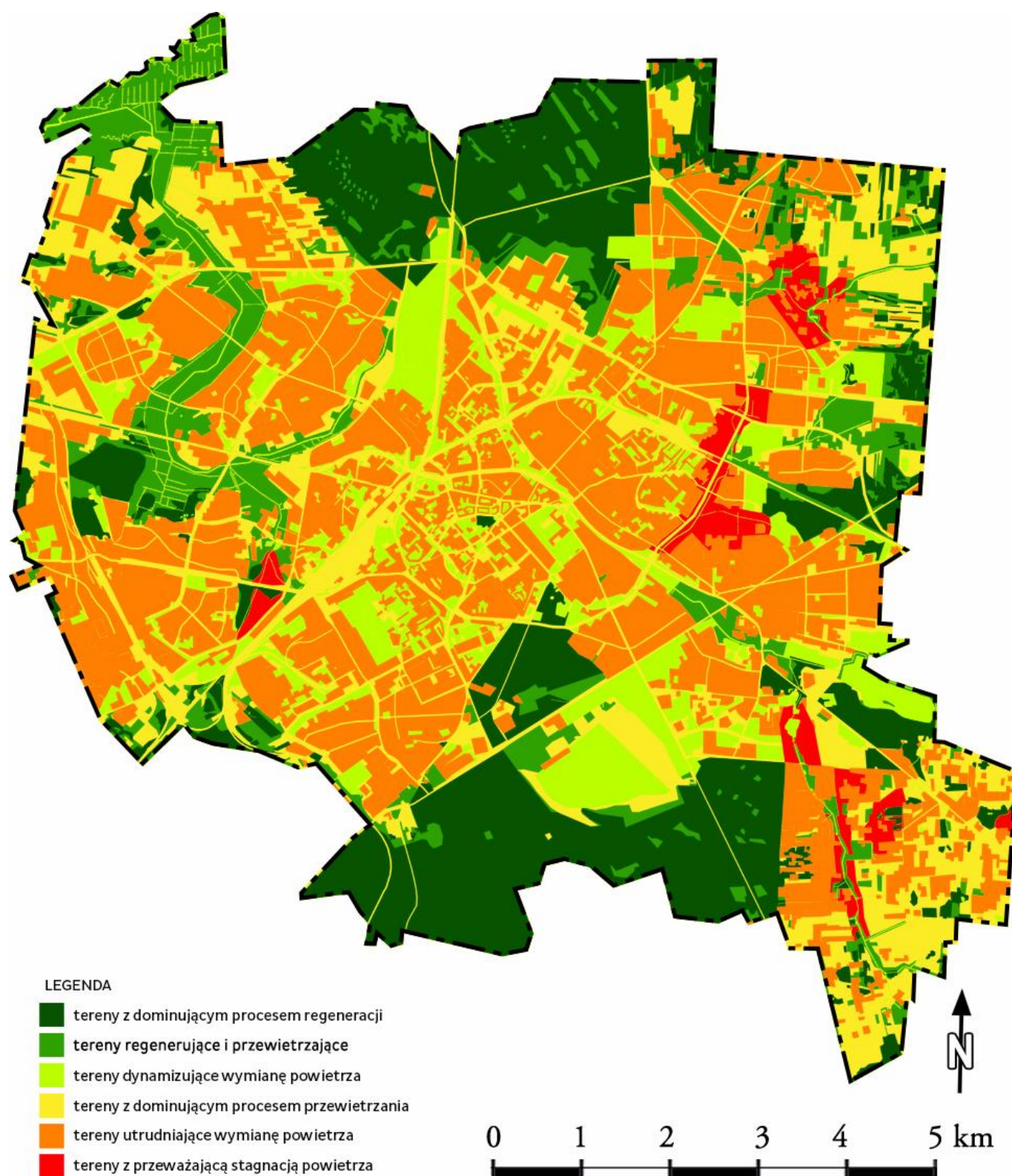
5. Analiza wymiany powietrza na terenie miasta

Korzystając z ortofotomapy z 21.04.2016 roku dostępnej na stronie internetowej Miejskiego Systemu Informacji Przestrzennej (<http://www.gisbialystok.pl>) możliwe było zlokalizowanie oraz oznaczenie opisanych wcześniej terenów o różnych funkcjach wymiany powietrza. Dzięki przeanalizowaniu obszaru całego miasta, utworzona została mapa obrazująca dynamikę mas powietrza w Białymstoku (rys. 2).

Do terenów z przeważającym procesem regeneracji zaliczyć można tereny zieleni znajdujące się w pobliżu granic miasta. Obszary pełniące rolę korytarzy usprawniających wymianę powietrza to w głównej mierze szerokie ciągi komunikacji kołowej, a w szczególności obwodnica miasta zwana „trasą generalską” oraz ulice wylotowe. Do takich korytarzy zaliczyć można również nasypy torów kolejowych skierowanych na wschód oraz na linii Warszawa – Białystok – Sokółka. Dolina rzeki Białej tworzy tereny regeneracji powietrza i przewietrzania, szczególnie w zachodniej części miasta. Zalicza się tu również obszary o rozproszonej zabudowie jednorodzinnej, częściowo pokryte drzewami i zaroślami. Tereny, które charakteryzują się optymalnymi warunkami termicznymi i wilgotnościowymi, a także są dobrze przewietrzane i nasłonecznione, znajdują się na północy i wschodzie Białegostoku oraz na jego południowym skraju. Dominują tam rzeźby faliste i falisto-pagórkowate (Kwiatkowski i Gajko, 2012). Obszary utrudniające przewietrzanie to przede wszystkim centrum miasta oraz osiedla z zabudową mieszkaniową wielorodzinną szczególnie w jego zachodniej oraz południowej części. Natomiast do terenów dynamizujących wymianę powietrza zalicza się głównie obszary śródmiejskich parków i skwerów, a także ogrodów działkowych i większych powierzchni zadarnionych. W Białymstoku znajduje się również kilka nieznacznych zagłębień, gdzie występować może proces stagnacji powietrza.



Rys. 1. Tereny zakwalifikowane na system przyrodniczy miasta (źródło: opracowanie własne na podstawie mapy z Miejskiego Systemu Informacji Przestrzennej)



Rys. 2. Analiza dynamiki mas powietrza w Białymstoku

Na podstawie przeprowadzonych analiz można wnioskować, iż Białystok jest miastem o dość dobrej wentylacji. W głównej mierze jest to zasługa doliny rzeki Białej oraz pokryciu się głównych ciągów przewietrzających z dominującymi kierunkami wiatrów. Na północy i południu znajdują się tereny leśne odpowiedzialne za odświeżanie powietrza. Korzystnym układem przestrzennym jest również w tym przypadku klin utworzony przez zielen miejską, który łączy Las Zwierzyniecki z parkami: Konstytucji 3 Maja, Planty, Pałacowym i ks. J. Poniatowskiego, wraz z fragmentem doliny rzeki Białej usytuowanej wzdłuż alei Piłsudskiego. Znalaziono również obszary cechujące się słabszą wentylacją. Są one w głównej mierze utworzone poprzez zwartą, wysoką zabudowę wielorodzinną na osiedlach mieszkaniowych. Dobrym przykładem może być pas osiedli Skorupy, Bojary i Sienkiewicza, gdzie zwiększająca się w kierunku centrum szorstkość powierzchni wraz z lokalnymi zagłębieniami terenu, przyczynia się do ograniczenia przepływu mas powietrza. Pozytywnym aspektem w tym przypadku jest jednak układ zabudowy na linii NW-SE, dzięki czemu nie stanowi ona przeszkody dla wiatrów wiejących z dominujących kierunków. Przeciwnie sytuacja wygląda w przypadku osiedli Wysoki Stoczek oraz Dziesięciny I i II, gdzie układ zabudowy odcina część miasta od dostaw powietrza znad doliny rzeki Białej. Powinno się zatem unikać lokalizowania budynków w jej obrębie. Na obszarach o ograniczonej wentylacji, duży udział w cyrkulacji powietrza mają obszary dynamizujące wymianę konwekcyjną, w tym dobrze rozwinięta zielen osiedlowa.

6. Podsumowanie

Korytarze przewietrzające miasta Białegostoku w większości usytuowane są zgodnie z przeważającymi kierunkami wiatru, dzięki czemu dobrze spełniają swoje funkcje. Istotne jest utrzymanie możliwie najmniejszej szorstkości powierzchni obszarów położonych na głównych kierunkach nawietrzania. Dzięki temu, poziomy przepływ powietrza będzie przyczyniać się do poprawy warunków przewietrzania miasta. W tym celu poprzez zapisy prawne, należy unikać lokalizowania budynków zwiększających szorstkość powierzchni, a w konsekwencji obniżających znaczenie funkcji przewietrzania. Korzystnym działaniem jest natomiast dążenie do zwiększania się udziału powierzchni biologicznie czynnych na obszarze korytarzy przewietrzających. Wśród zwartej zabudowy potrzebne są powierzchnie kontrastowe termicznie, które dynamizują wymianę konwekcyjną powietrza. Przyczyni się to do poprawy cyrkulacji powietrza na terenach słabo przewietrzanych. W Białymstoku oddziaływanie takich powierzchni ma w głównej mierze charakter lokalny. Biorąc pod uwagę ciągły rozwój terenów zurbanizowanych, należy je planować w taki sposób, aby masy powietrza zachowywały się w sposób pożądaný.

Literatura

- Amado M. P., Ramalhete I., Amado A. R., Freitas J. C. (2016). Regeneration of informal areas: An integrated approach. *Cities*, Vol. 58, 59-69.
- Bartocha A., Chmura U., Kuczer M., Rosicki M., Wahlig W. (2008). Program ochrony powietrza dla aglomeracji białostockiej (powiatu grodzkiego białostockiego). *ATMOTERM® S.A.*, Opole.
- Gál T., Unger J. (2008). Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Building and Environment*, Vol. 44, 198-206.
- Gnatowska R. (2013). Planowanie terenów zabudowanych w zgodzie z zasadami zrównoważonego rozwoju z zastosowaniem metod modelowych. *Inżynieria Ekologiczna*, 33/2013, 35-40.
- Górniak A. (2000). Klimat województwa podlaskiego. *Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, Białystok.
- Huchzermeyer M., Karam A. (2006). Informal settlements: A perpetual challenge? M. Huchzermeyer, A. Karam (Eds.), *University of Cape Town Press*, Cape Town.
- Kwiatkowski W., Gajko K. (2011). Ekofizjografia Białegostoku. Tom I: Wstęp i Diagnoza Stanu Środowiska Przyrodniczego, Białystok, 23-28.
- Kwiatkowski W., Gajko K. (2012). Ekofizjografia Białegostoku. Tom II: Ocena i Funkcjonowanie Środowiska, Uwarunkowania Ekofizjograficzne. Białystok, 107-111.
- Laskowski L. (1987). Wybrane Zagadnienia Fizyki Miasta. *Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa*, Warszawa.
- Ng E. (2008). Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. *Building and Environment*, Vol. 44, 1478-1488.
- Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego, Uchwała Nr XVII/254/16 Rady Miasta Białystok z dnia 18 stycznia 2016 r.
- Su N., Zhou D., Jiang X. (2016). Study on the application of ventilation corridor planning in urban new area – A case study of Xixian New Area. *Procedia Engineering*, Vol. 169, 340-349.
- Szulczewska B., Cieszevska A., Giedych R. (2009). Opracowanie ekofizjograficzne wykonane na potrzeby Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta Kielce. *SGGW*, Warszawa, 201-205.
- Zaręba K. (2012). Zrównoważony rozwój w warunkiem zabezpieczenia funkcji rekreacyjnych uzdrowisk. *Inżynieria Ekologiczna*, 30/2012, 206-218.
- Zielonko-Jung K. (2014). Zwarta przestrzeń miejska jako środowisko budynków energooszczędnych. *Architectus*, Vol. 38, Nr 2, 49-57.

ANALYSIS OF VENTILATING BIAŁYSTOK CITY

Abstract: In cities with insufficient ventilation a tendency to excessive accumulation of pollutants in the air can be observed. In the paper, the area of Białystok city was analysed in terms of the air masses dynamics to evaluate the way of its air ventilation. Analyses were based on aerial photographs of the city detailing the following areas: with dominance of the processes of air regeneration, air ventilation and regeneration, boosting the exchange of air, with dominance of the processes of air ventilation, with dominance of air stagnation and those that impede the exchange of air. There were also discussed issues related to the spatial planning aimed at improving the function of ventilation system of the city.

Pracę wykonano w ramach pracy statutowej S/WBiŚ/2/16 realizowanej na Politechnice Białostockiej.

INSTALACJA GEORUR W ŚWIELE BADAŃ POLOWYCH I LABORATORYJNYCH

Błażej SMOLIŃSKI*

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska,
Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

Streszczenie: W pracy zaprezentowano proces instalacji georur – wielkogabarytowych syntetycznych kontenerów, stosowanych między innymi do budowy i renowacji wałów przeciwpowodziowych, konstrukcji ostróg regulacyjnych, podpiętrzania poziomu wód, załadowania obszarów wodnych czy odwadniania osadów dennych. W artykule omówiono przebieg wybranych etapów prac i badań polowych zrealizowanych na poligonie badawczym zlokalizowanym na brzegu Wisły w Warszawie. Zaprezentowano program badań, mający na celu wyznaczenie parametrów geotechnicznych charakteryzujących grunt wykorzystany do napełnienia georury oraz parametry wytrzymałościowe płaszcza. Analizie poddano techniczne aspekty związane z możliwościami stosowania georur w konstrukcji obwałowań przeciwpowodziowych.

Słowa kluczowe: georury, geosyntetyki, badania polowe.

1. Wprowadzenie

Technologia georur jest znana na Zachodzie od przeszło 50 lat i jest z powodzeniem stosowana w projektowaniu konstrukcji hydrotechnicznych, w tym: obwałowań, falochronów i przeciweurozrywnych umocnień brzegowych (Smoliński, 2016). Obecnie georury stosowane są coraz częściej również w Polsce. Funkcjonujące na rynku firmy posiadają w swojej ofercie produkty klasy światowej, o ogólnie uznanej renomie i jakości. Z uwagi na znaczne oszczędności związane z minimalizacją robót betonowych, kosztów wykonania narzutów i materacy kamiennych, technologia georur wzbudza coraz większe zainteresowanie podmiotów i osób zajmujących się projektowaniem konstrukcji hydrotechnicznych. Z uwagi na relatywnie krótki czas stosowania tego typu rozwiązań w warunkach polskich, wszelkie spostrzeżenia dotyczące aspektów wykonawczo-eksploatacyjnych należy uznać za szczególnie cenne. Zgromadzenie odpowiednio rozbudowanego zbioru danych dotyczących wykonawstwa i eksploatacji georur pozwoli na opracowanie specjalistycznych zaleceń i krajowych wytycznych umożliwiających zoptymalizowanie projektowanych rozwiązań bazujących na technologii georur.

2. Instalacja i napełnianie georur

Planując podjęcie prac nad zagadnieniem, nawiązano współpracę z licznymi podmiotami zewnętrznymi

z branży szeroko pojętej hydrotechniki i geotechniki.

Na terenie piaskarni Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie, na praskim brzegu Wisły, zorganizowany został poligon badawczy, na którym podczas seminarium hydrotechnicznego (Popielski, 2017) zaprezentowano proces instalacji i napełniania georur.

Istotnym aspektem związanym z końcowym sukcesem w napełnianiu georury jest odpowiednie przygotowanie podłoża pod konstrukcję. W tym celu fragment poligonu przeznaczony pod posadowienie georury został wyrównany oraz wstępnie zagęszczony za pomocą sprzętu ciężkiego (spycharka). Po uformowaniu platformy roboczej (rys. 1), umożliwiającej równomierne rozłożenie geotkaniny (georury), wykonano warstwę podkładową z geowłókniny, stanowiącą zabezpieczenie przed wymywaniem gruntu spod napełnianej georury przez odsączającą się z niej wodę. Na wstępnym etapie przygotowań konieczne było również odpowiednie rozplanowanie kanałów odpływowych, którymi odcieki z refulatu mogły być odprowadzane w sposób bezpieczny z powrotem do koryta rzecznego. Doświadczenia praktyczne pokazują, że rozwiązaniem optymalnym jest wykonanie platformy roboczej z niewielkim, stałym spadkiem w kierunku pożądanego kierunku odpływu.

Realizacja procesu napełniania georury wymagała odpowiedniego zaplecza technicznego. Wskazane jest, aby niezbędny sprzęt ciężki wyposażony był w napęd gąsienicowy. W trudnym, zwłaszcza grząskim lub piaszczystym terenie, znacznie ułatwia to prowadzenie

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: blazej.smolinski@is.pw.edu.pl



Rys. 1. Przygotowanie platformy roboczej. Widoczna pompa bagrowa (fot. B. Smoliński)

prac. Nie bez znaczenia są również względy bezpieczeństwa, wynikające z działań w bezpośrednim sąsiedztwie zbiorników wodnych, w tym także o wysokich brzegach.

Pobór rumowiska rzecznoego odbywał się za pomocą wysokowydajnej pompy bagrowej zasilanej hydraulicznie za pośrednictwem koparki. Szlam tłoczono do wnętrza georury systemem rur ciśnieniowych wyposażonych w szybkozłącza, które w przypadku zapchania się rurociągu umożliwiały szybkie usunięcie zatoru. W celu uniknięcia potencjalnych komplikacji i związanych z tym przestoi technologicznych prowadzono bieżącą kontrolę proporcji tłoczonego refulatu, okresowo zwiększając zawartość wody dla przepłukania całej instalacji.

Sam proces napełniania realizowany był za pośrednictwem systemu kominków (rys. 2), zlokalizowanych w górnej części płaszcza. Ważnym aspektem jest ich rozstaw oraz liczba. Ma to znaczący wpływ na równomierność napełniania geosyntetyku i uzyskanie w końcowym efekcie pożądanej formy przestrzenno-geometrycznej płaszcza oraz parametrów materiału wypełniającego georurę. Rurociąg tłoczny systematycznie przepinano pomiędzy poszczególnymi kominkami, starając utrzymywać równomierny przyrost objętości napełnianej georury na całej jej długości. Dzięki zastosowaniu na końcowym odcinku rurociągu tłocznego głowicy obrotowej z możliwością regulacji kierunku wypływu, wydajność i efektywność procesu znacząco wzrastała (rys. 3). Cały proces napełniania podlegał stałemu nadzorowi doświadczonego pracownika.

Napełnianie georury odbywało się etapowo: fazy pompowania oddzielały od siebie fazy odsączania, podczas których następowało stopniowe odwadnianie zgromadzonego w płaszczu refulatu. Było to możliwe dzięki parametrom stosowanego płaszcza geosyntetycznego, charakteryzującego się wysoką wodo-



Rys. 2. Kominiek do napełniania georury (fot. B. Smoliński)

przepuszczalnością (Pilch, 2013). Wymagane było również staranne dobranie charakterystycznego wymiaru porów materiału płaszcza, względem uziarnienia refulatu, tak aby zapobiec wymywaniu frakcji gruntowych z wnętrza georury, przy jednoczesnym zminimalizowaniu zjawiska kolmatacji geosyntetyku. Oznaką pełnego napełnienia georury było zaobserwowanie wypływu pompowanej mieszaniny przez jeden z kominków (rys. 4 i 5).

Cennym elementem wykonywanych prac był ciągły pomiar odkształceń płaszcza podczas poszczególnych faz napełniania i odsączania. Wykorzystano do tego celu zestaw nowoczesnych czujników (na przykład profilometr), o bardzo dużej dokładności i częstotliwości akwizycji danych, dzięki czemu pozyskano precyzyjne informacje dotyczące stanu wyężenia konstrukcji (rys. 6). Opracowanie i wykorzystanie tych pomiarów do dalszych analiz oraz modelowanie numeryczne będą przedmiotem oddzielnych publikacji.



Rys. 3. Napełnianie georury. Widoczny rurociąg tłoczny z głowicą podłączoną do kominka (fot. B. Smoliński)



Rys. 4. Napełnianie georury. Widoczny wypływ refulatu z kominka (fot. B. Smoliński)



Rys. 5. Napętniona georura (fot. B. Smoliński)



Rys. 6. Napętnianie georury. Widoczne czujniki pomiarowe zamontowane na płaszczu (fot. B. Smoliński)

3. Badania polowe i laboratoryjne

Systematycznemu i stopniowemu odwadnianiu refulatu towarzyszyły procesy konsolidacji. Powodowało to zmianę parametrów materiałowych wypełnienia georury w czasie. Po zakończeniu napętniania i odsączeniu materiału przystąpiono do dalszych badań. Po rozcięciu geosyntetycznego płaszcza zaobserwowano wyraźne zróżnicowanie stref materiałowych, związanych z kolejnymi fazami napętniania (rys. 7). Zmianie uległo również zagęszczenie materiału. W celu dokonania analizy tego zjawiska wykonano badania terenowe.

Badania polowe zrealizowane przy współpracy z Instytutem Techniki Budowlanej obejmowały między innymi sondowania sondą lekką, na podstawie których możliwe jest określenie stopnia zagęszczenia badanego gruntu. Ponadto wykonano sondowania CPT, i pomiary dylatometrem płaskim (DMT). Zaletą wykonanych badań jest ciągłość wykonanych pomiarów, w każdym z profili pionowych.

Uzupełnieniem badań polowych są badania laboratoryjne, stanowiące ważny element weryfikacyjny. Z poszczególnych przekroji pomiarowych wyznaczonych w obrębie georury pobrane zostały próbki NNS.

Na podstawie wykonanych oznaczeń wilgotności i gęstości objętościowej wyznaczony zostanie przestrzenny rozkład gęstości objętościowej szkieletu gruntowego. Parametry wytrzymałościowe gruntu (c , φ), otrzymano w wyniku badań przeprowadzonych w aparacie bezpośredniego ścinania. Analizie podlegały również wilgotność optymalna gruntu oraz maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, określone z badań w aparacie Proctora (metoda I).

4. Dalsze kierunki prac

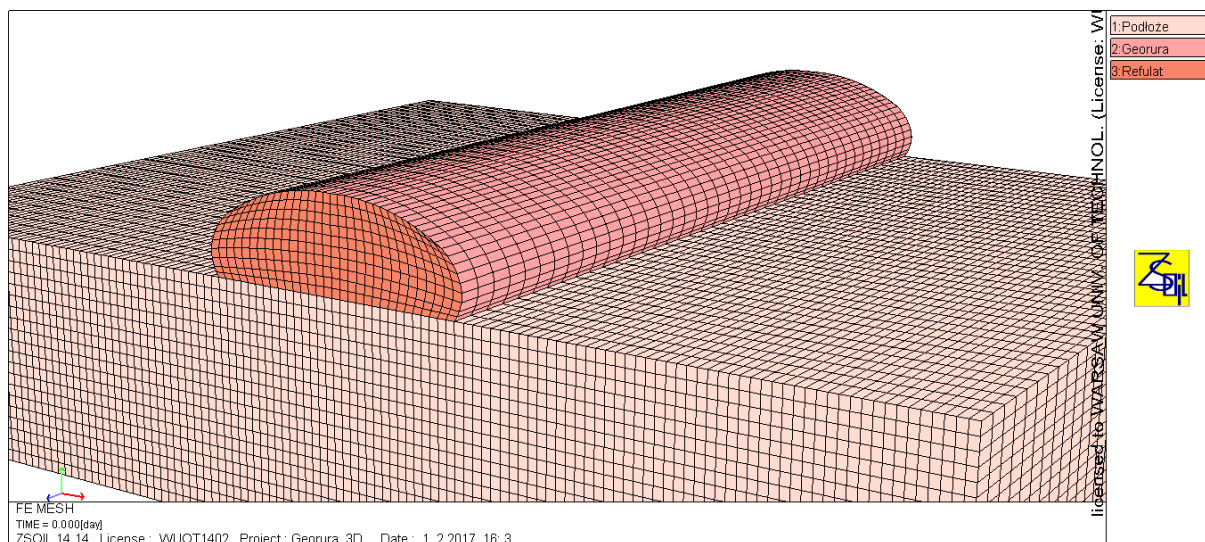
Obecnie prowadzone są prace związane z weryfikacją uzyskanych wyników pochodzących zarówno z badań laboratoryjnych, jak i polowych. Na podstawie zależności

korelacyjnych (CPT, DMT) i badań polowych wyznaczone zostaną parametry geotechniczne gruntu wraz z modułami opisującymi jego sztywność.

Celem tych analiz jest eksperckie oszacowanie wartości parametrów materiałowych i współczynników jakie zostaną zaimplementowane do opracowanego trójwymiarowego modelu numerycznego analizowanej konstrukcji (rys. 8). Wykonane wariantowe symulacje pozwolą na oszacowanie naprężeń i odkształceń występujących w płaszczu przy założeniu współpracy podłoża gruntowego z refulatem wypełniającym georurę oraz zlokalizowanie rejonów ich koncentracji. Konstrukcja modelu przewiduje uwzględnienie w obliczeniach odpowiednio skalowanych elementów typu interface. Możliwe więc będzie dokładne scharakteryzowanie wzajemnej współpracy w strefie kontaktu



Rys. 7. Uwarstwienie gruntu wewnątrz georury (fot. B. Smoliński)



Rys. 8. Numeryczny model 3D georury

geosyntetyk-grunt. Aspekt ten wedle danych literaturowych jest zazwyczaj pomijany (Leshchinsky i in., 1996; Pilarczyk, 2000) w procesie projektowania, a może mieć wpływ na wytrzymałość płaszcza i stateczność tego typu konstrukcji. W procesie kalibracji wygenerowanego modelu wykorzystane zostaną dane pozyskane z czujników zainstalowanych na płaszczu w czasie napełniania georury. Dzięki analizom numerycznym opartym na parametrach o wartościach wyznaczonych na podstawie badań terenowych i laboratoryjnych, realnej ocenie zostanie poddana efektywność stosowania georur w budownictwie wodnym.

5. Podsumowanie

Wykonywane w czasie napełniania georury pomiary i obserwacje pozwolą na dopracowanie zagadnień techniczno-wykonawczych. Rezultaty badań połowych i laboratoryjnych, a także analizy numeryczne będą cennym uzupełnieniem wiedzy w zakresie omawianego zagadnienia.

W opinii autora, umożliwi to rzetelne przedstawienie ograniczeń i zalet technologii georur i przyczyni się w znaczący sposób do rozwoju hydrotechniki w Polsce.

Literatura

- Leshchinsky D., Leshchinsky O., Ling H.I., Gilbert P.A. (1996). Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: Some design aspects. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 8, 682-690.
- Pilarczyk W.K. (2000). Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Pilch M. (2013). Ochrona brzegów morskich georurą SoilTain® na przykładzie zabezpieczenia wydmy w Rowach. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4/2013, 106-113.
- Popielski P. (2017). Zastosowanie geosyntetyków w budownictwie wodnym-seminarium hydrotechniczne. *Gospodarka Wodna*, 1/2017, 33.
- Smoliński B. (2016). Zastosowanie technologii geotub w budownictwie hydrotechnicznym. *Monografie "Inżynieria Środowiska - Młodym Okiem"*, Tom 25, 282-302.

INSTALLATION OF GEOTUBES BASED ON LABORATORY AND FIELD TESTS

Abstract: The paper presents the process of installation of geotubes-synthetic containers, used for the construction and renovation of flood embankments, water damming and sludge dewatering. The article discusses the course of selected stages of research and field works carried out on a research field located on the bank of the Vistula river in Warsaw. To determine the geotechnical parameters characterizing of soil filling the geotubes and the strength parameters of geosynthetic shell, a systematically implemented researched program was presented. The technical aspects related to the possibilities of using geotubes in construction of flood embankment were analyzed.

Pracę wykonano w Politechnice Warszawskiej w ramach grantu dziekańskiego Nr 504/02640 realizowanego na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, pod opieką naukową dr hab. inż. Pawła Popielskiego, prof. PW. Autor składa serdeczne podziękowania za pomoc w organizacji poligonu badawczego oraz realizacji badań:

- Przedsiębiorstwu Realizacyjnemu INORA® sp. z o. o.,
- NeoStrain sp. z o.o.,
- Miejskiemu Przedsiębiorstwu Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie,
- WICHARY Technologies sp. z o.o.,
- EFB Partner,
- Instytutowi Techniki Budowlanej.

ANALIZA PORÓWNAWCZA CIŚNIENIA WIATRU NA BUDYNEK NA PODSTAWIE BADAŃ TUNELOWYCH, SYMULACJI KOMPUTEROWYCH I NORM PROJEKTOWYCH

Marcin SZKOBODZIŃSKI*, Czesław MIEDZIAŁOWSKI

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 E, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule poruszono temat ustalania obciążenia wiatrem budowli za pomocą symulacji komputerowych (CFD), badań tunelowych i ich porównanie do wytycznych normowych. Opisano podstawowy zakres teorii związanej z symulacjami CFD i wybrane modele turbulencji. Porównanie współczynników ciśnienia wiatru uzyskanych z badań tunelowych, symulacji komputerowych i modeli normowych przedstawiono na dwóch przykładach: budynku o dachu dwuspadowym i budowli o kształcie walca kołowego.

Słowa kluczowe: obciążenie wiatrem, modele normowe, tunel aerodynamiczny, komputerowa mechanika płynów.

1. Wprowadzenie

Proces wyznaczania obciążenia wiatrem budowli o nietypowych kształtach napotyka wiele trudności związanych z określeniem wiarygodnego rozkładu ciśnienia na połaciach dachowych oraz ścianach. Wynika to przede wszystkim ze sposobu przemieszczania się powietrza w strefie przyziemnej, gdzie przepływowi towarzyszą liczne turbulencje zależne od rodzaju terenu. Ze względu na wiele czynników, które mogą wpływać na zmiany składowych prędkości wiatru, zjawisko traktowane jest jako losowe. Dokładny sposób wyznaczenia rzeczywistego oddziaływania wiatru na etapie projektowym staje się więc niemożliwy i wymaga optymalnego zdefiniowania wartości ciśnień pomiędzy rozsądnym ich zawyżeniem, a zapewnieniem bezpieczeństwa budowli. Uzyskanie kompromisowego rozwiązania umożliwia wprowadzenie uśrednień czasowych podczas pomiaru prędkości wiatru, które pozwalają na inny sposób definicji zjawiska z wykorzystaniem wartości średniej oraz fluktuacyjnej.

Określenie obciążenia wiatrem budowli nietypowych charakteryzujących się skomplikowanym kształtem jest zagadnieniem wykraczającym w większości przypadków poza wytyczne i modele zawarte w normach projektowych. Zachodzi więc potrzeba poszukiwania rozwiązań, które umożliwiłyby szybkie, proste i tanie rozwiązanie problemu przy jednoczesnym wskazaniu jak najlepszych rezultatów, odwzorowujących obciążenie rzeczywiste. Norma PN-EN 1991-1-4:2008 *Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Obciążenia wiatrem* wskazuje, że obciążenie

wiatrem może być przyjęte w sposób inny niż normowy w oparciu o uznane i wiarygodne źródła. Zazwyczaj w takich sytuacjach stosowane są tunele aerodynamiczne, lecz badania pociągają za sobą obok wielu zalet również wady skupiające się głównie wokół wysokich nakładów finansowych i małej dostępności aparatury badawczej. Przykłady analiz rozkładu ciśnienia i wytyczne badań w tunelach aerodynamicznych można znaleźć między innymi w pracach Li i in. (2006), Yi i Li (2015), Mamou i in. (2008), Davenport (2007), Pereira (2011).

Obecny potencjał mocy obliczeniowej komputerów pozwala na opis zjawiska przepływu powietrza wokół analizowanej budowli. Pomimo, iż do tej pory nie opracowano jeszcze uniwersalnej metody pozwalającej na badanie przepływów płynów, to istnieją algorytmy o specjalnym przeznaczeniu, wykorzystywane do badań konkretnych zjawisk. Symulacje komputerowe nazywane również analizami CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) dają zazwyczaj najlepsze rezultaty, kiedy stosowane są jako tak zwane metody półempiryczne. Wstępnie przeprowadzona analiza może natomiast stanowić podstawę do przyjęcia podstawowych założeń podczas doświadczeń w tunelach aerodynamicznych.

W poniższym opracowaniu przedstawiono w jakim stopniu symulacje komputerowe przepływu powietrza wokół konstrukcji są w stanie przewidzieć zjawisko oddziaływania wiatru i jego ciśnienie na budowlę, w nawiązaniu do obowiązujących norm projektowych i badań w tunelach aerodynamicznych. Celem pracy jest przedstawienie obecnego stanu wiedzy dotyczącego poruszanej tematyki.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.szkbodzinski@doktoranci.pb.edu.pl

2. Przewidywanie obciążenia wiatrem za pomocą symulacji komputerowych

2.1. Teoria przepływów turbulentnych

Przepływ powietrza wokół analizowanego obiektu można wyrazić za pomocą układu nieliniowych równań różniczkowych Naviera-Stockesa (N-S) i równania ciągłości, stanowiących podstawę obliczeń numerycznych. W przypadku badania przepływu płynu, którym w tym przypadku jest powietrze, przyjmowane jest założenie ośrodka newtonowskiego i nieściśliwego. Ruch powietrza poruszającego się wokół analizowanego obiektu jest traktowany jako przepływ turbulentny, któremu towarzyszy powstawanie licznych zaburzeń. Matematyczne możliwości opisanie przepływu turbulentnego jako zjawiska losowego są ograniczone, dlatego też do obliczeń numerycznych stosowana jest zasada uśrednienia Reynoldsa polegająca na założeniu, że chwilowe składowe prędkości i ciśnienia są rozdzielone na wartości średnie oraz fluktuacyjne, w dowolnym czasie i punkcie przestrzeni (Elsner, 1987; Lipecki, 2015; Bogusławski i in., 2008).

Składowe ciśnienia (p) i prędkości (u) są wyrażone równaniami (1) i (2):

$$p = \bar{p} + p' \quad (1)$$

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2)$$

Uwzględnienie zasady uśredniania Reynoldsa pozwala zapisać równania N-S w postaci (3):

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji} - \overline{\rho u'_j u'_i}) \quad (3)$$

gdzie: U_i jest składową wektora prędkości, x_i są współrzędnymi układu globalnego, ρ jest gęstością powietrza, P jest ciśnieniem, μ jest dynamiczną lepkością płynu, a f_i jest wektorem sił masowych.

Dodatkowy w stosunku do równań Naviera-Stockesa człon $-\overline{\rho u'_j u'_i}$ nazywany tensorem naprężeń Reynoldsa posiada sześć niewiadomych, co sprawia, że przy nieznanym ciśnieniu i trzech składowych prędkościach suma niewiadomych wielkości jest równa dziesięciu. Mając do dyspozycji jedynie równanie ciągłości i trzy równania N-S niemożliwe jest rozwiązanie zagadnienia i konieczne jest wprowadzenie dodatkowych zależności umożliwiających rozwiązanie. Są one nazywane modelami turbulencji lub hipotezami zamykającymi (Wilcox, 1993).

Uśrednienia równań N-S można dokonywać stosując uśrednienie czasowe (modele RANS – ang. *Reynolds Averaged Navier Stokes*) lub przestrzenne (LES – ang. *Large Eddy Simulation*) i to właśnie grupy tych modeli są najczęściej wykorzystywane w analizach budowli (Lipecki, 2015). Istnieje również metoda bezpośredniego rozwiązywania równań (DNS – ang. *Direct Numerical Simulation*) oraz metoda bezsiatkowa (DVM – ang. *Discrete Vortex Method*), których zastosowanie przedstawiają przykładowo prace Saeedi i in. (2012) i Nowickiego (2015).

2.2. Wybrane modele turbulencji wykorzystywane w analizach CFD budowli

W związku z dużą liczbą modeli turbulencji wykorzystywanych w analizach CFD o różnorodnym charakterze badawczym, opisano jedynie wybrane z nich, które wykazują popularność zastosowania do oceny zjawiska oddziaływania wiatru na budowle. W skrócie opisano model turbulencji k - ε standard (RANS) i LES.

2.2.1. Model k - ε standard

Model k - ε standard (RANS), po raz pierwszy przedstawiony w pracy Launder i Spalding (1973), jest zaliczany do grupy modeli dwurównaniowych, ponieważ wprowadza dwa dodatkowe równania dotyczące kinetycznej energii turbulencji (4) i dyssypacji energii kinetycznej turbulencji (5) (Wilcox, 1993).

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

Wyrażenie definiujące dynamiczny współczynnik lepkości turbulentnej (6) i stałe modelu:

$$\mu_T = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44; C_{\varepsilon 2} = 1,92, C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1,0, \sigma_\varepsilon = 1,3$$

Zaletą modelu jest fakt, iż jest jednym z najlepiej zweryfikowanych modeli turbulencji i tym samym znane są jego ograniczenia. W wielu jednak zastosowaniach technicznych analizy przepływów, w których głównie występują zjawiska wirowości i wysokich naprężeń ścinających, wykazuje słabą dokładność wyników (Błazik-Borowa (2008).

2.2.2 Model LES

Model turbulencji LES pozwala na symulację wirów poprzez uśrednianie przestrzenne przepływu. Duże wiry o rozmiarze zbliżonym do rozmiaru siatki są symulowane, natomiast o rozmiarach mniejszych są modelowane za pomocą tak zwanych modeli SGS (ang. *subgrid-scale model*). Za pomocą filtrowania równania ciągłości i N-S możliwe jest pominięcie wirów mniejszych w przepływie, co pozwala na redukcję nakładów ponoszonych na obliczenia. Równania N-S z uwzględnieniem filtracji opisuje wzór (7) (Lipecki, 2015; Zhiyin, 2015).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (7)$$

Tensor naprężeń SGS określa wyrażenie (8):

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\nu \overline{S_{ij}} \quad (8)$$

Przy czym

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right),$$

natomiast ν_t jest lepkością turbulentną, która w pierwszym modelu SGS zaproponowanym w pracy (Smagorinsky, 1963) określa wzór (9):

$$\nu_t = (C_s \Delta_g)^2 \sqrt{2 \overline{S_{ij} S_{ij}}} \quad (9)$$

gdzie: C_s jest stałą, a Δ_g rozmiarem siatki obliczeniowej.

3. Modele normowe

Normy projektowe opisują sposób definiowania obciążenia wiatrem dla typowych konstrukcji najczęściej spotykanych w praktyce inżynierskiej. W wielu przypadkach może jednak zachodzić potrzeba wyznaczenia oddziaływania na obiekty o specyficznych kształtach. Poszukiwane są więc rozwiązania mające na celu wiarygodne odzwierciedlenie obciążenia wiatrem konstrukcji. Wytyczne normowe wskazują, że w przypadkach budowli nietypowych wyznaczone wartości ciśnienia należy definiować na podstawie badań w tunelach aerodynamicznych na specjalnie przygotowanych modelach (Cook, 2007; PN-EN 1991-1-4:2008; PN-77/B-02011).

Adaptacja norm projektowych do opisu obciążenia wiatrem konstrukcji złożonych, polegająca na połączeniu kilku schematów prostych, nie odzwierciedla w wiarygodny sposób oddziaływania na siebie interferujących mas opływającego powietrza. Może to skutkować przyjęciem niewłaściwego rozkładu obciążenia szczególnie w przypadkach, gdy analiza odnosi

się do budowli już istniejących i wymaga bardziej szczegółowego sposobu jej przeprowadzenia. Pomimo to, bazując na pojęciu granicznego stanu nośności dobór schematów pozwalających w racjonalny sposób zawyżyć obciążenie wydaje się być rozwiązaniem efektywnym.

Sposób interpretacji zaleceń normy PN-77/B-02011 *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem* przedstawiono między innymi w pracach: Żurański (1978), Biegus (2010), Żurański i Gaczek (2011), natomiast obowiązującej normy PN-EN 1991-1-4:2008 w opracowaniach: Żurański (2005, 2010), Żurański i Gaczek (2010, 2011), Biegus (2010), Cook (2007).

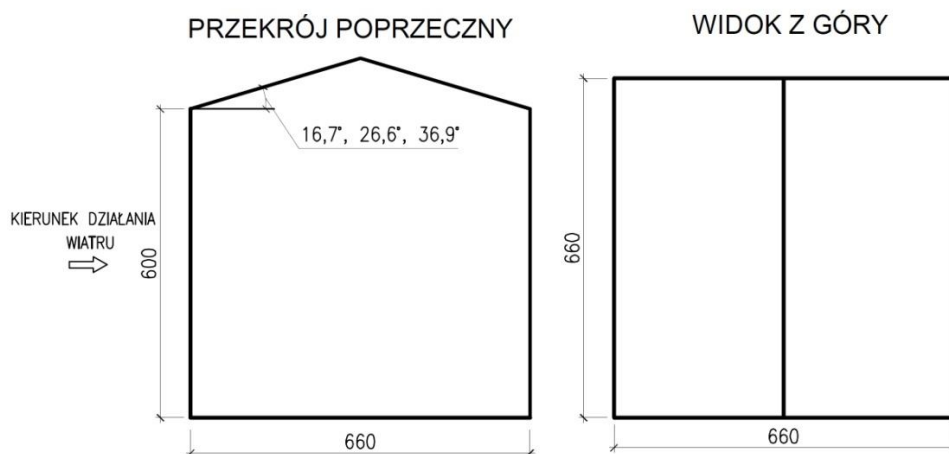
4. Porównanie modeli normowych z badaniami eksperymentalnymi i symulacją komputerową

W celu porównania podejść normowych (PN-77/B-02011 i PN-EN 1991-1-4:2008) z badaniami przeprowadzonymi w tunelu aerodynamicznym i analizami numerycznymi przeanalizowano podobieństwo współczynników ciśnienia wiatru. Wyniki przedstawiono na przykładzie budynku o dachu dwuspadowym i budowli o kształcie walca kołowego.

4.1. Budynek o dachu dwuspadowym

Analizowanym obiektem był budynek zaproponowany w opracowaniu (Tominaga i in., 2015) posiadający dach dwuspadowy oraz podstawę w kształcie kwadratu o boku 6,6 m. Wysokość ścian wynosiła 6,0 m. Przedstawiono trzy warianty obliczeń budynków różniąc kątem nachylenia połaci dachowych: 16,7°, 26,6° i 36,9°. Obiekt schematycznie pokazano na rysunku 1.

W pracy (Tominaga i in., 2015) przedstawiono wyniki badań wykonanych w tunelu aerodynamicznym i uzyskane z symulacji CFD. Rezultaty rozszerzono o porównanie wartości współczynników ciśnienia wiatru obliczone według modeli normowych PN-77/B-02011 i PN-EN 1991-1-4:2008.



Rys. 1. Schemat budynku przyjęty w badaniach Tominaga i in. (2015)

Norma PN-EN 1991-1-4:2008 pozwala na bezpośrednie określenie współczynników ciśnienia pól A do E w zależności od stosunku h/d oraz pól F do J dachów dwuspadowych w zależności od kąta nachylenia połaci. Dla wartości pośrednich umożliwiono stosowanie interpolacji liniowej. Wyznaczone wartości współczynników ciśnienia zewnętrznego przyjętego budynku zestawiono w tabeli 1.

Sposób prowadzenia obliczeń według normy PN-77/B-02011 jest zbliżony do podejścia normy europejskiej z tym wyjątkiem, że w przypadku ścian współczynniki są określane na podstawie dwóch wielkości H/L i B/L . Obciążenie dachu dwuspadowego jest otrzymywane na podstawie współczynników zależnych od kąta nachylenia połaci i stosunku h/L . Podział połaci na kilka pól oddziaływania wiatru zostaje zastąpiony jednym jednolitym polem odpowiednio dla połaci wewnętrznej i zewnętrznej. Uzyskane wartości współczynników zestawiono w tabeli 2.

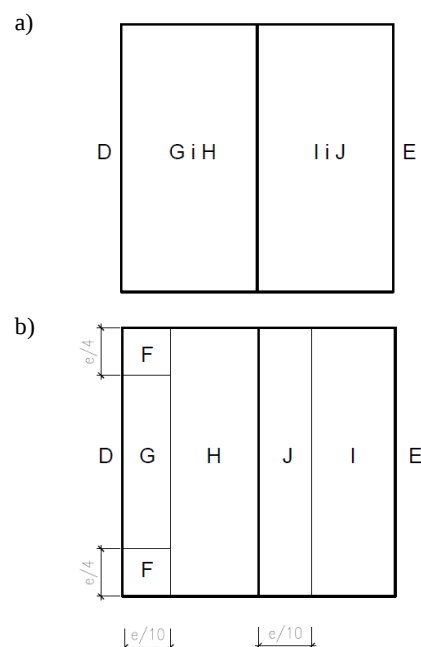
Badania przedstawione w Tominaga i in. (2015) zostały przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną w Instytucie w Niigacie. Sekcja robocza urządzenia posiadała wymiary przekroju poprzecznego 1,8 m na 1,8 m oraz długość 13 m. Model badanego obiektu wykonano w skali 1:30 natomiast wymiar chropowatości uzyskany za pomocą różnego rodzaju przeszkód na wlocie został oszacowany na $z_0 = 1,0 \cdot 10^{-4}$ m. Prędkość wlotowa wynosiła $U = 2,6$ m/s w celu uzyskania możliwie jak najwyższej wartości liczby Reynoldsa wynoszącej w tym przypadku około 35000. Ciśnienie mierzono w 24 punktach rozmieszczonych wzdłuż ścian i połaci dachu przy użyciu wielopunktowego przetwornika Kyowa Electronic Instruments F94-2206 (Tominaga i in., 2015).

Symulacja komputerowa została przeprowadzona z wykorzystaniem programu komputerowego ANSYS Fluent. Model oraz domenę obliczeniową zdefiniowano w sposób odpowiadający badaniom tunelowym. Na wlocie zadano warunek brzegowy w postaci profilu prędkości wiatru, kinetycznej energii turbulencji, odpowiadające pomiarom eksperymentalnym, oraz zerowe ciśnienie statyczne na wylocie. Wartość ε uzyskano przy założeniu lokalnej równowagi produkcji energii kinetycznej turbulencji i jej dyssypacji. Powierzchnie badanego obiektu opisano za pomocą standardowej funkcji ściany (*standard wall function*), której użyto również do opisu gruntu wprowadzając modyfikację polegającą na uwzględnieniu chropowatości terenu. Górę oraz ściany domeny obliczeniowej zdefiniowano za pomocą warunku brzegowego symetrii (ang. *symmetry*). Analizy

przeprowadzono dla czterech modeli turbulencji $k-\varepsilon$ standard, RNG $k-\varepsilon$, RLZ $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST, z czego do porównania z wartościami eksperymentalnymi użyto modelu RNG $k-\varepsilon$.

Wymiary domeny obliczeniowej przyjęto odpowiadające wymiarom komory roboczej tunelu aerodynamicznego, w którym przeprowadzono badania doświadczalne. Wynosiły one: wysokość $H = 9 \cdot h$, szerokość $W = 9 \cdot h$, długość $L = 21 \cdot h$, gdzie h jest wysokością ściany obiektu (Tominaga i in., 2015).

Porównanie przedstawiono w formie graficznej uzupełniając wyniki badań tunelowych i symulacji komputerowych o wartości współczynników normowych (rys. 3).



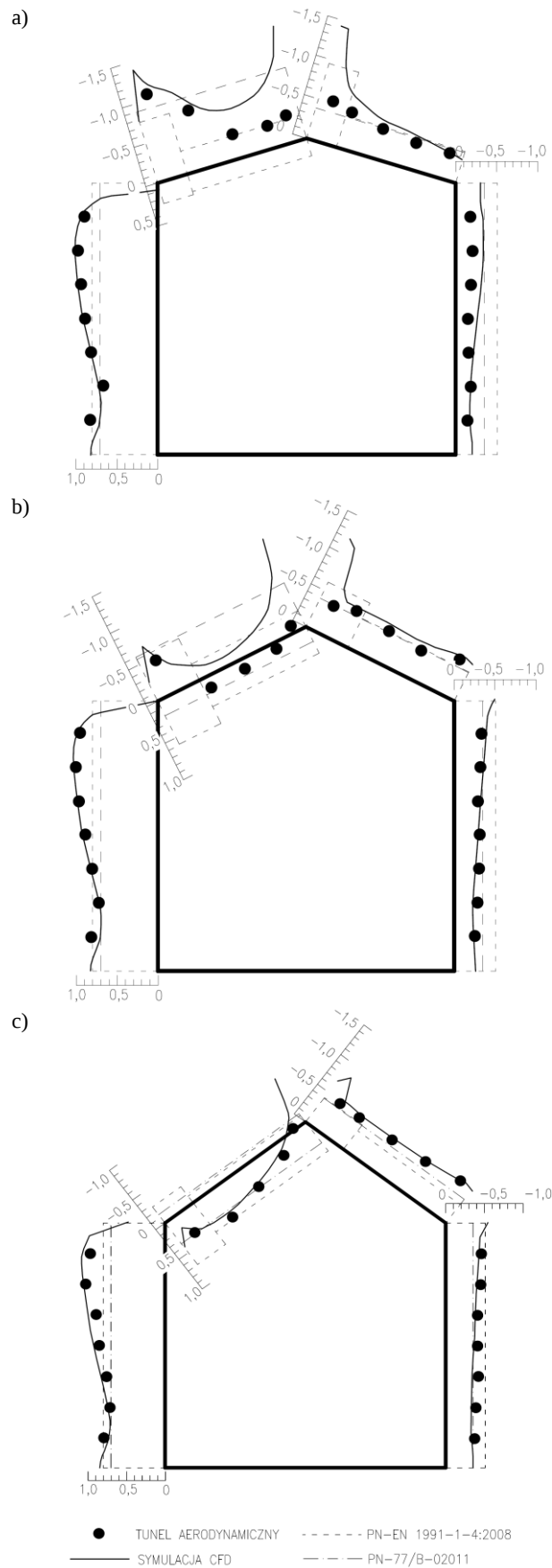
Rys. 2. Pola podziału ścian i połaci dachu według oznaczeń dla tabeli 1 i 2: a) PN-77/B-0201, b) PN-EN 1991-1-4:2008

Tab. 2. Zestawienie współczynników ciśnienia według normy PN-77/B-02011

Kąt	D	E	G i H	I i J
16,7°	+0,70	-0,35	-0,90	-0,40
26,6°	+0,70	-0,35	-0,60	+0,20
36,9°	+0,70	-0,35	-0,14	+0,35

Tab. 1. Zestawienie współczynników ciśnienia według normy PN-EN 1991-1-4:2008

Kąt	D	E	G	H	I	J
16,7°	+0,80	-0,51	-0,77	+0,26	-0,29	+0,22
26,6°	+0,80	-0,51	-0,57	+0,59	-0,22	+0,36
36,9°	+0,80	-0,51	-0,27	+0,70	-0,11	+0,49



Rys. 3 Porównanie współczynników ciśnienia zewnętrznego budynku o różnym nachyleniu dachu dwuspadowego: a) kąt nachylenia połaci $16,7^\circ$, b) kąt nachylenia połaci $26,6^\circ$, c) kąt nachylenia połaci $36,9^\circ$

4.2. Budowla o kształcie walca kołowego

Przeanalizowano budowlę w kształcie walca kołowego poddanego przepływowi powietrza o charakteryzującej liczbie Reynoldsa w zakresie odpowiadającym wartościom podanym w normie PN-EN 1991-1-4:2008. W celu porównania wartości normowych z badaniami eksperymentalnymi i symulacjami komputerowymi skorzystano z wyników zawartych w pracach: Roshko (1960), Achenbach (1968), Warschauer i Leene (1971), Nunen (1974), Travin i in. (1999), Catalano i in. (2002), Krishnani i Squires (2006), Merrick i Bitsuamlak (2008), Yeon (2014). Analizowano wykresy współczynnika ciśnienia zewnętrznego przepływów o zbliżonych wartościach liczby Reynoldsa określonych na podstawie przeglądu literatury. Wykresy normowe wyznaczono według danych przyjętych w badaniach eksperymentalnych.

Norma PN-EN 1991-1-4:2008 określa współczynniki ciśnienia zewnętrznego walców kołowych uzależniając ich wartość od liczby Reynoldsa. Na podstawie wartości tabelarycznych istnieje możliwość wskazania kąta określającego punkt najniższego ciśnienia $\alpha_{\min}$, najmniejszą wartość współczynnika ciśnienia $c_{p0,\min}$, kąt określający punkt oderwania przepływu α_A oraz współczynnik bazowy ciśnienia $c_{p0,h}$. Norma umożliwia również redukcję wartości współczynnika ciśnienia ze względu na efekt swobodnego końca wprowadzając współczynnik zależny od kąta α oraz smukłości elementu analizowanego λ . W zestawieniu porównawczym przyjęto, iż wartość chropowatości względnej wynosi $k/b < 5 \cdot 10^{-4}$.

Norma PN-77/B-02011 pozwala na wyznaczenie współczynnika ciśnienia zewnętrznego na podstawie wykresu zawartego w normie lub równania (10) określających wielkość szukaną w zależności od kąta α .

$$C_\alpha = \sum_{n=0}^{n=6} a_n \cdot \cos n\alpha \quad (10)$$

Wyrazy szeregu trygonometrycznego (10) wynoszą:

$$a_0 = -0,356, a_1 = 0,322, a_2 = 0,636, a_3 = 0,501, a_4 = 0,058, a_5 = -0,128, a_6 = -0,034$$

Wartościom współczynnika ciśnienia mniejszym od zera zalecono uwzględnienie parametru k stanowiącego funkcję odwrotności smukłości D/H , czyli stosunku średnicy do wysokości walca, natomiast dla kątów powyżej 110° przyjęcie wartości stałej równej $-0,4$. Do obliczeń przyjęto wartość współczynnika k równą 1,0 odpowiadającą stosunkowi D/H równemu 0,5.

Wykresy obrazujące porównanie wyników badań przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

5. Podsumowanie

W pracy zaprezentowano porównanie wartości współczynników ciśnienia wiatru otrzymanych na podstawie norm PN-EN 1991-1-4:2008 i PN-77/B-02011 z wynikami otrzymanymi z symulacji

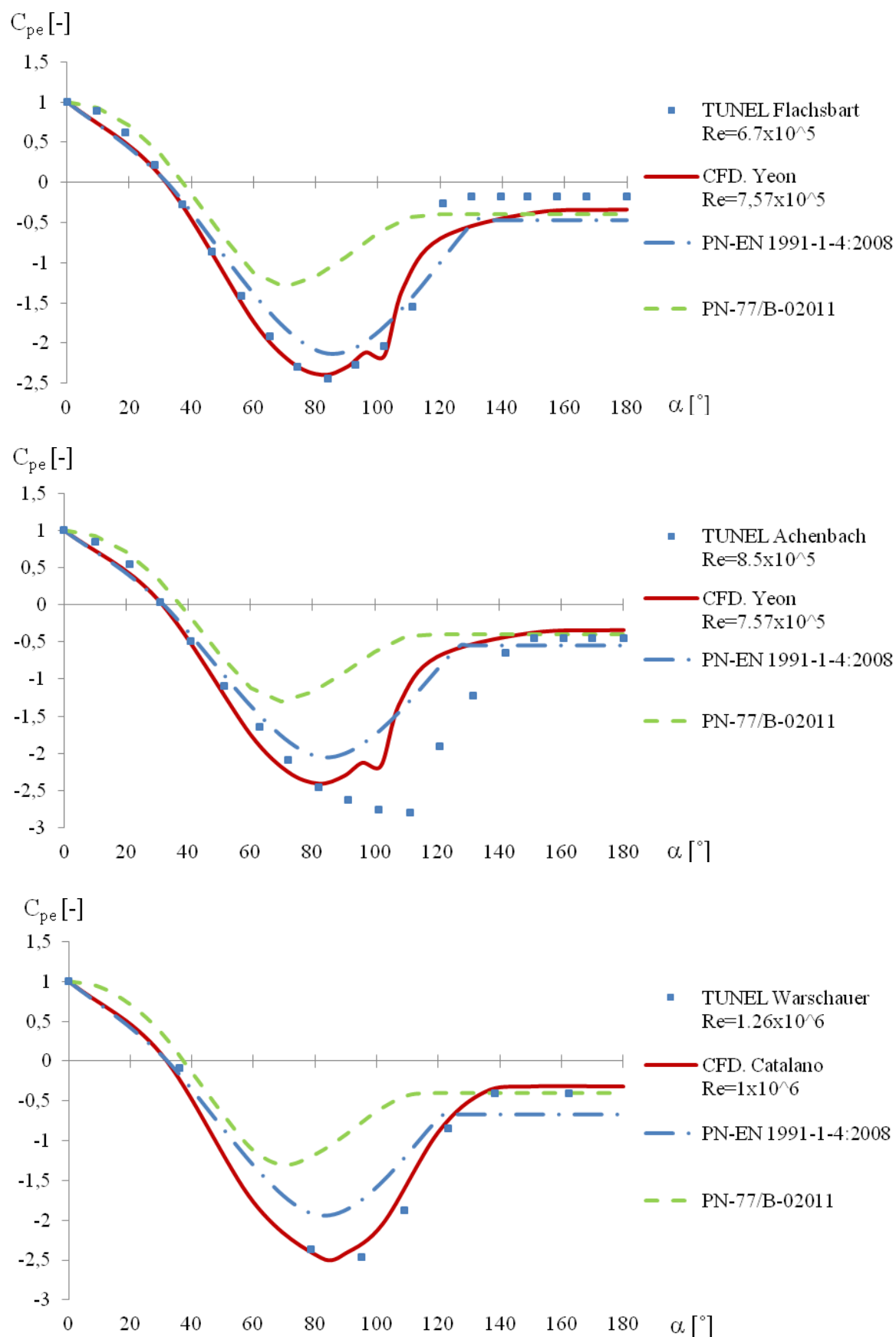
komputerowych i badań w tunelu aerodynamicznym. Wartości współczynników ciśnienia porównano na przykładach budynku o dachu dwuspadowym i budowli o kształcie walca kołowego.

Analiza wyników w przypadku budynku o dachu dwuspadowym wykazała, iż modele normowe w większości pól podziału obciążenia są w stanie bezpiecznie oszacować wartości współczynników ciśnienia zewnętrznego. Niemniej jednak w strefie przykrawędziowej nawietrznej połaci dachu dla kąta nachylenia $16,7^\circ$ zaobserwowano niedoszacowanie wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego na poziomie około 39% w przypadku PN-EN 1991-1-4:2008 i około 19% w przypadku PN-77/B-02011, odnosząc się do wyników eksperymentalnych. Podobna sytuacja występuje w górnej części ściany nawietrznej, gdzie zauważalne są wyższe wartości współczynników otrzymanych na podstawie doświadczenia w stosunku do norm projektowych. Rezultaty otrzymane na podstawie analizy CFD wykazują dobrą korelację z wynikami badań eksperymentalnych, lecz w strefie przykalenicowej dla mniejszych kątów nachylenia połaci widoczne jest zaniżenie wartości współczynników ciśnienia. Jak podają Tominaga i in. (2015), jest to podyktowane przeszacowaniem turbulentnej energii kinetycznej k w tej strefie, co wynika z zastosowania modelu $k-\epsilon$.

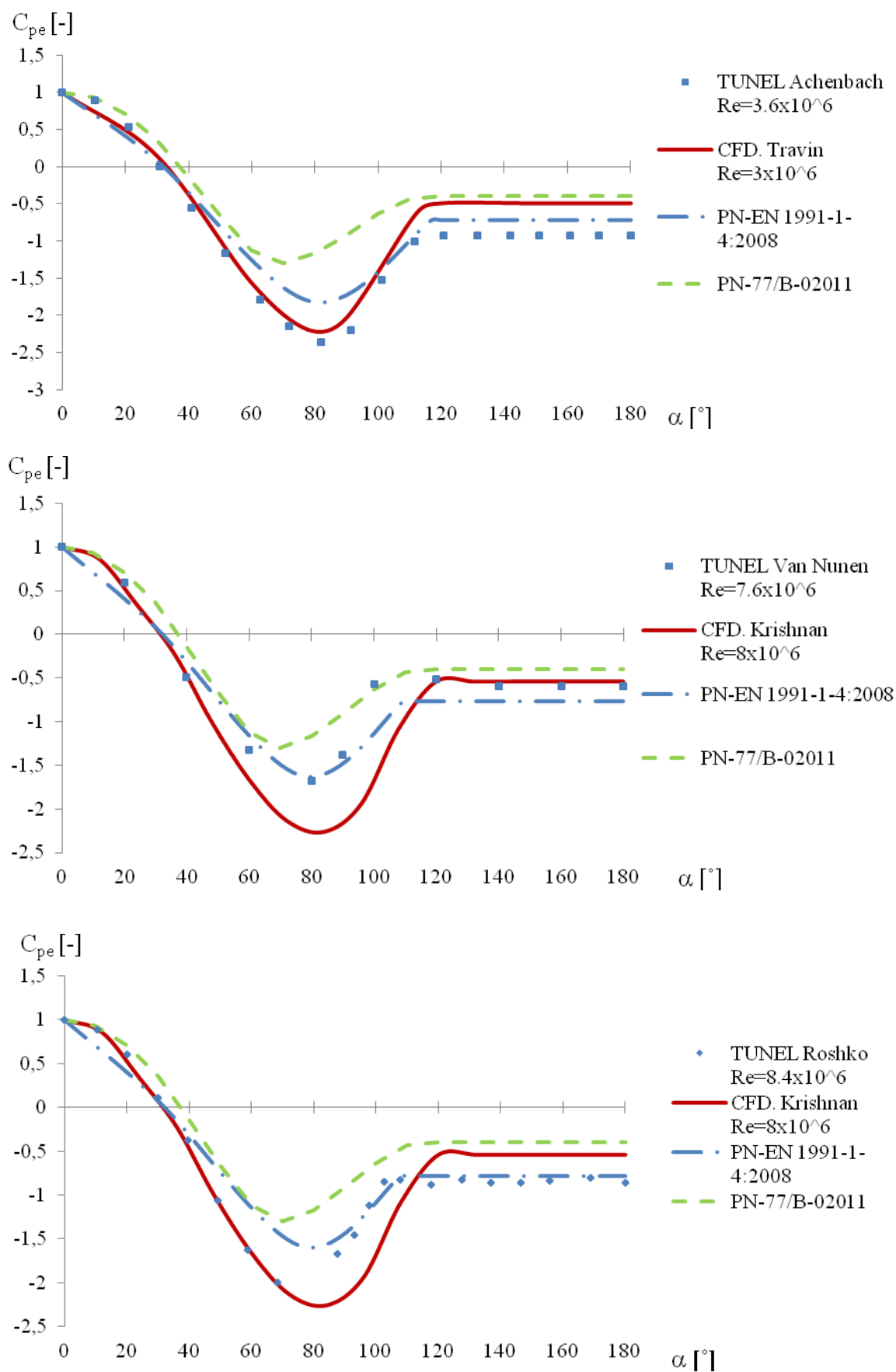
Sposób rozkładu współczynnika ciśnienia zewnętrznego na powierzchni wydzielonej walca kołowego określony według normy PN-EN 1991-1-4:2008 wskazuje na dobrą korelację z wynikami otrzymanymi na podstawie badań w tunelach aerodynamicznych. Wyjątek stanowią przypadki, w których liczba Reynoldsa oscyluje w granicach około 10^6 , gdzie jak podaje Żurański (1978) należy spodziewać się najsilniejszego podciśnienia na walcu kołowym, lecz ze względu na fakt, iż konstrukcje w rzeczywistości są narażone na przepływ powietrza o liczbie Reynoldsa znacznie wyższej, to współczynnik ciśnienia zewnętrznego może posiadać wartość wyższą.

Wyniki uzyskane według normy PN-77/B-02011 pokazują wyraźne rozbieżności pomiędzy wartościami w stosunku do pozostałych analizowanych sposobów. W pracy (Żurański, 1978) zaznaczono, że wyrazy szeregu (10) powinny być dobierane na podstawie danych pomiarowych, a wyrazy zawarte w normie są wartościami zalecanymi, które pozwalają na osiągnięcie $C_{z,\min} = -1,3$. Fakt ten pozwala na stwierdzenie, że wartości dobranych wyrazów szeregu nie odpowiadają wszystkim przypadkom zależnym od liczby Reynoldsa przepływu powietrza.

Wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego otrzymane z symulacji komputerowej przepływu powietrza wokół walca kołowego wykazują w przypadku prac (Yeon, 2014; Catalano i in., 2002) – (LES) dobrą korelację z badaniami doświadczalnymi, nie mniej jednak widać pewne rozbieżności mogące wynikać po części z różnic w liczbie Reynoldsa. Podobna sytuacja występuje w przypadku symulacji (Travin i in., 1999) – (DES). Największe różnice zaobserwowano dla największych liczb Reynoldsa (Krishnan i Squires, 2006) – (DES).



Rys. 4. Porównanie współczynników ciśnienia zewnętrznego – budowla o przekroju walca kołowego



Rys. 5. Porównanie współczynników ciśnienia zewnętrznego – budowla o przekroju walca kołowego c. d.

Literatura

- Achenbach E. (1968). Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re = 5 \times 10^6$. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 34, 625-639.
- Biegus A. (2010). Projektowanie konstrukcji budowlanych według Eurokodów: zeszyt 1 część 2 – oddziaływania na konstrukcje. *Zeszyty edukacyjne Buildera*.
- Błazik-Borowa E. (2008). Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji k-e do wyznaczania parametrów opływu budynków. *Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej*, Lublin.
- Bogusławski A., Drobnik S., Tyliczak A. (2008). Turbulencja – od losowości do determinizmu. *Modelowanie inżynierskie*, Vol. 36, 41-48.
- Catalano P., Wang, M., Iaccarino G., Moin P. (2002). Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 24, 463-469.
- Cook N. (2007). Designers' Guide to EN 1991-1-4 Eurocode 1: Actions on structures, general actions part 1-4. Wind actions. *Thomas Telford Publishing*, Londyn.
- Davenport A. G. (2007). Wind tunnel testing: a general outline. *A. G. Davenport Wind Engineering Group*, University of Western Ontario, Ontario.
- Elsner J. W. (1987). Turbulencja przepływów. *Państwowe Wydawnictwo Naukowe*, Warszawa.
- Krishnan V., Squires K. D. (2006). Prediction of the flow around a circular cylinder at high Reynolds number. *Proceeding of the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 9-12 January 2006, Reno.
- Lauder B. E., Spalding D. B. (1973). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, 269-289.
- Li Q. S., Fu J. Y., Xiao Y. Q., Li Z. N., Ni Z. H., Xie Z. N., Gu M. (2006). Wind tunnel and full-scale study of wind effects on China's tallest building. *Engineering Structures*, Vol. 28, 1745-1758.
- Lipecki T. (2015). Struktura wiatru i badania modelowe obciążenia wiatrem budowli prostopadłościennych. *Politechnika Lubelska*, Lublin.
- Mamou M., Cooper K. R., Benmeddour A., Khalid M., Fitzsimmons J., Sengupta R. (2008). Correlation of CFD predictions and wind tunnel measurements of mean and unsteady wind loads on a large optical telescope. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, 793-806.
- Merrick R., Bitsuamlak G. (2008). Control of flow around a circular cylinder by the use of surface roughness: A computational and experimental approach. *Proceeding of the 4th International Conference Advances on Wind and Structures (AWAS08)*, Jeju.
- Nowicki T. (2015). The Discrete Vortex Method for estimating how surface roughness affects aerodynamic drag acting on a long cylinder exposed to wind. *Czasopismo Techniczne Budownictwo 2-B/2015*, Politechnika Lubelska, Lublin.
- Nunen J. V. (1974). Pressure and forces on a circular cylinder in a cross flow at high Reynolds numbers. *Flow Induced Structural Vibrations*, Springer-Verlag, Berlin, 748-754.
- Pereira J. D. (2011). Wind tunnels: aerodynamics, models and experiments. *Nova Science Publishers*, Nowy York.
- Roshko A. (1960). Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 3, 345-356.
- Saeedi M., Lepoudre P., Wang B.C (2012). Direct Numerical Simulation of flow around a surface-mounted square-section cylinder with $AR=4$. *Proceedings of the 20th Annual Conference of the CFD Society of Canada*, Canmore.
- Smagorinsky J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, 99-164.
- Tominaga Y., Akabayashi S., Kitahara T., Arinami Y. (2015). Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations. *Building and Environment*, Vol. 84, 204-213.
- Travin A., Shur M., Strelets M., Spalart P. (1999). Detached-Eddy Simulations past a circular cylinder. *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 63, 293-313.
- Warschauer K.A., Leene J.A. (1971). Experiments on mean and fluctuating pressures of circular cylinders at cross flow at very high Reynolds numbers. *Proceedings of the International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, Tokyo, 305-315.
- Wilcox D. C. (1993). Turbulence modeling for CFD. *DCW Industries*, La Canada.
- Yeon S. M. (2014). Large-eddy simulation of sub-, critical and super-critical Reynolds number flow past a circular cylinder. *PhD thesis, University of Iowa*, Iowa.
- Yi J., Li Q. S. (2015). Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a super-tall building. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 58, 236-253.
- Zhiyin Y. (2015). Large-eddy simulation: past, present and the future. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 28, 11-24.
- Żurański J. A. (1978). Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji. *Arkady*, Warszawa.
- Żurański J. A. (2005). Wpływ warunków klimatycznych i terenowych na obciążenie wiatrem konstrukcji budowlanych. *Wydawnictwa Instytutu techniki Budowlanej*, Warszawa.
- Żurański J. A. (2010). Oddziaływania wiatru na konstrukcje budowlane w ujęciu nowej normy PN-EN 1991-1-4:2008. *Inżynieria i Budownictwo*, 7/2010, 360-367.
- Żurański J. A., Gaczek M. (2010). Obciążenie wiatrem budynków w ujęciu normy PN-EN 1991-1-1:2008. *Inżynieria i Budownictwo*, 9/2010, 494-501.
- Żurański J. A., Gaczek M. (2011). Oddziaływania klimatyczne na konstrukcje budowlane według Eurokodu. *Instytut Techniki Budowlanej*, Warszawa.

COMPARATIVE ANALYSIS OF WIND PRESSURE ON A BUILDING BASED ON WIND TUNNEL STUDY, COMPUTER SIMULATIONS AND DESIGN STANDARDS

Abstract: The paper aim is to determine the wind loads on buildings by means of computer simulation (CFD), wind tunnel measurements and their comparison to the standard guidelines. The basic range of the theory with CFD simulations and selected models of turbulence are described. Comparison of wind pressure factors received from: wind tunnel research, computer simulations and the standard guidelines is shown on two examples: building with a pitched roof and structure in the shape of a circular cylinder.

NISKOKOSZTOWY, BEZZAŁOGOWY STATEK POWIETRZNY WYPOSAŻONY W KAMERĘ NIEMETRYCZNĄ JAKO ŹRÓDŁO DANYCH WYSOKOŚCIOWYCH

Michał TARGOŃSKI*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania mające na celu ocenę potencjału pomiarowego kamery niemetrycznej umieszczonej na platformie lotniczej operującej na niskim pułapie. Wykorzystano do tego popularny model zdalnie sterowanego czterowirnikowca. Pozyskane zobrażenia zostały przetworzone do postaci trójwymiarowej chmury punktów, którą skonfrontowano z danymi LiDAR zebranymi w ramach projektu ISOK.

Słowa kluczowe: Bezzałogowy Statek Powietrzny, dron, chmura punktów, GIS.

1. Wprowadzenie

Wykorzystanie Bezzałogowych Statków Powietrznych (BSP) nazywanych popularnie dronami (ang. *drone* – truteń, brzęczek), przestało być wyłączną domeną wojska. Spadek cen platform lotniczych przyczynił się do dynamicznego rozwoju sektora cywilnego. Obecnie BSP są wykorzystywane między innymi do tworzenia materiałów promocyjnych, monitorowania imprez masowych, inwentaryzacji majątku, patrolowania dróg czy koordynacji akcji ratunkowych (ULC, 2013).

Zdalnie sterowane modele mogą być wyposażone w różnego rodzaju aparaturę rejestrującą (aparaty, kamery, skanery), która pozwala wykonywać badania z zakresu ochrony przyrody, leśnictwa, rolnictwa, budownictwa i energetyki. Wraz z udoskonalaniem sprzętu ma miejsce rozwój oprogramowania służącego między innymi do planowania misji czy sterowania wirnikowcem podczas lotu. Powstają również narzędzia służące do półautomatycznego lub automatycznego przetwarzania zebranych danych oraz tworzenia z nich produktów pochodnych, takich jak: ortofotomapy, chmury punktów czy Numeryczne Modele Pokrycia Terenu (NMPT) (Bujakiewicz i Preuss, 2016).

Celem pracy była ocena możliwości wykorzystania kamery niemetrycznej umieszczonej na Bezzałogowym Statku Powietrznym do pozyskiwania danych wysokościowych.

2. Kamera niemetryczna źródłem danych wysokościowych

Systemy BSP wyposażone w kamery niemetryczne mogą pełnić rolę platform fotogrametrycznych i tele-detekcyjnych do realizacji badania na niewielkich obszarach. Pozyskane cyfrowo zobrażenia fotogrametryczne stanowią dwuwymiarową projekcję terenu na płaszczyznę tłową zdjęcia, zapisaną w postaci macierzy pikseli, w których przechowywana jest odpowiedź spektralna poszczególnych elementów terenowych. Dane te mogą być wykorzystane do wytworzenia Numerycznych Modeli Terenu (NMT), brył budynków, a nawet ekstrakcji ich poszczególnych elewacji. Wykorzystanie odpowiedniego pakietu fotogrametrycznego pozwalającego na automatyczne generowanie NMPT i NMT oraz tworzenia ortoobrazu zapewnia końcowy produkt o dokładności kilku centymetrów (ULC, 2013; Bujakiewicz i Preuss, 2016).

Technologia gęstego dopasowania pokrywających się cyfrowych zdjęć fotogrametrycznych pozwala na generowanie trójwymiarowej chmury punktów. Algorytm korelacji obrazów stereoskopowych ma na celu rekonstrukcję trójwymiarowej powierzchni poprzez wyszukanie punktów homologicznych na parze zdjęć o znanej orientacji wewnętrznej i zewnętrznej. W przypadku gdy mamy do czynienia ze zdjęciami cechującymi się dużym pokryciem podłużnym i poprzecznym, algorytm wykorzystuje kombinację wielu stereo-dopasowanych zdjęć, dostarczając nadliczbowych obserwacji, co pozwala eliminować błędy dopasowywania, a dzięki temu zwiększyć dokładność generowania chmury punktów. Wynikiem korelacji zdjęć

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.targonski@student.pb.edu.pl

jest zbiór punktów (posiadających współrzędne XYZ), zdefiniowanych w prostokątnym układzie współrzędnych, przedstawiających obiekty w przestrzeni trójwymiarowej (Kędzierski i in., 2014; Bujakiewicz i Preuss, 2016).

3. Teren i metodyka badań

W lipcu 2016 roku przeprowadzono fotogrametryczny nalot niskopłanowy z wykorzystaniem popularnego modelu czterowirnikowca DJI Phantom 3 Advanced o napędzie elektrycznym, sterowanego zdalnie lub poruszającego się po wcześniej zaplanowanej trasie (Phantom 3, 2015).

Obszar opracowania obejmuje fragment miasta Białegostoku, będący częścią kampusu Politechniki Białostockiej. Jest to prostokąt o wymiarach 150×145 m, o powierzchni 2,175 ha (rys. 1). Obecnie znajdują się na nim trzy budynki Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska, których trójwymiarową reprezentację chciano uzyskać.

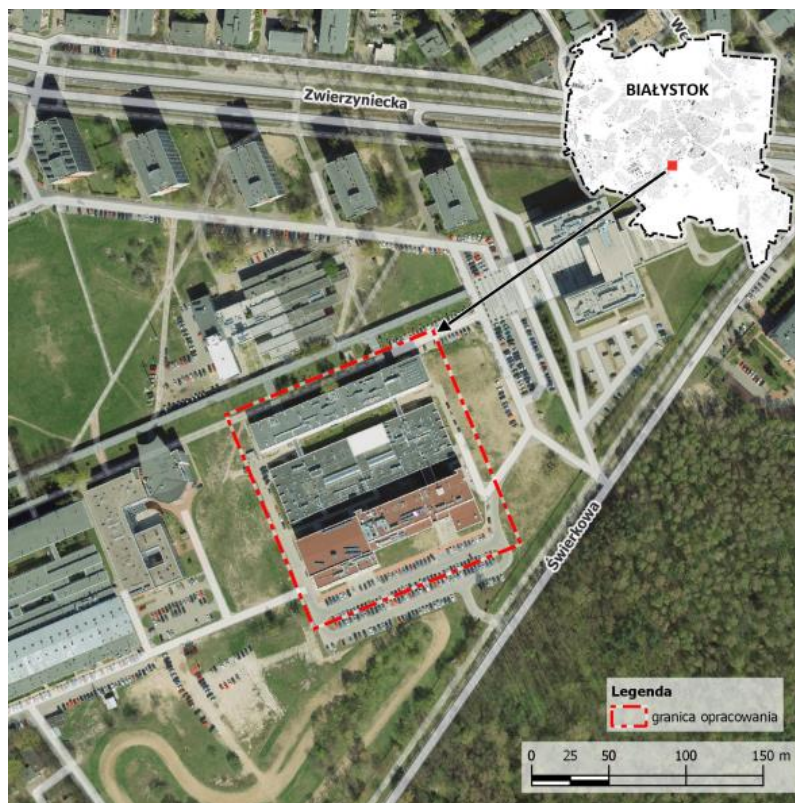
W trakcie nalogów wykonano serie 197 zdjęć o znacznym wzajemnym pokryciu podłużnym i poprzecznym. Część fotografii została wykonana jako zdjęcia prawie pionowe, przedstawiające głównie dachy budynków oraz elementy infrastruktury, które się na nich znajdują. W celu odwzorowania elewacji budynków wykonano zdjęcia ukośne, które pozwalają również na uwidocznienie podcieni budynków i innych elementów niewidocznych z góry (Bujakiewicz i Preuss, 2016).

Pozyskane zobrazowania zostały przetworzone

z wykorzystaniem oprogramowania, które umożliwia w pełni automatyczną orientację wzajemną z jednoczesnym wyznaczaniem parametrów orientacji wewnętrznej. Wykorzystano do tego celu oprogramowane PhotoScan firmy Agisoft w wersji profesjonalnej, które jest zaawansowanym narzędziem służącym do tworzenia danych trójwymiarowych na podstawie fotografii wykonanych aparatami cyfrowymi (zarówno metrycznymi, jak i niemetrycznymi). Pozwala ono na wygenerowanie chmury punktów o wysokiej gęstości, reprezentującej trójwymiarowy model pokrycia terenu analizowanego obszaru, wykorzystując procedurę wieloobrazowego dopasowywania (Agisoft, 2016).

Otrzymane wyniki porównano z chmurą punktów, znajdującą się w Państwowym Zasobie Geodezyjnym i Kartograficznym, pozyskaną metodą LiDAR. LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*) jest to aktywny system teledetekcyjny wykorzystujący promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu bliskiej podczerwieni. Zamontowane w skanerze źródło światła generuje impulsy, a moduł obliczeniowy określa czas od jego wysłania do powrotu do urządzenia po odbiciu od przeszkody terenowej (Podręcznik, 2014)

Do porównania wykorzystano chmurę punktów LiDAR pozyskaną na terenie Białegostoku w ramach projektu ISOK, wykonaną w Standardzie II, ze średnią gęstością 12 pkt/m². Dokładność wysokościowa (błąd średni) chmury po wyrównaniu wynosi $\leq 0,10$ m, natomiast dokładność sytuacyjna (błąd średni) po wyrównaniu $\leq 0,40$ m (CODGiK, 2017).



Rys. 1. Lokalizacja obszaru opracowania. Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych CODGiK i Open Street Map

4. Analiza uzyskanych wyników

Podstawowym produktem otrzymanym w wyniku przeprowadzonych badań jest gęsta chmura punktów widoczna na rysunku 2, powstała ze zdjęć wykonanych nad obszarem opracowania (rys. 3). Składa się ona z ponad 16 miliona punktów, które szczegółowo odwzorowują trójwymiarową bryłę budynków znajdujących się na analizowanym obszarze. Dla porównania, chmura punktów pozyskanych metodą LiDAR, obejmująca ten sam teren, składa się z około 1,8 miliona punktów.

Średnia gęstość punktów pozyskanych metodą LiDAR, które zostały wykorzystane do budowy NMPT (jedynie punkty zarejestrowane jako pierwsze odbicia oraz należące do klas: grunt, roślinność, budynki, budowle i obiekty inżynierskie), wyniosła 8,3 pkt/m² (rys. 4a). Poprzez korelację zdjęć uzyskano średnią gęstość 759 pkt/m², jednak w tym przypadku – z uwagi na dużą nadliczbowość punktów znajdujących się na elewacjach budynków – bardziej miarodajna będzie mediana gęstości, która wyniosła 543 pkt/m² (rys. 4b).

Analizując przestrzenny rozkład gęstości punktów należy zwrócić uwagę na luki w danych pozyskanych metodą LiDAR. Wyraźnie widać, że wiązka lasera nie zarejestrowała dwóch świetlików znajdujących się na dachu budynku, podczas gdy te obiekty są widocznie na chmurze pozyskanej ze zdjęć.

Gęsta chmura punktów posłużyła do stworzenia Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (rys. 5b), na którym wyraźnie widać zmiany, jakie zaszły pomiędzy 2012 a 2016 rokiem na analizowanym obszarze. Można rozpoznać nowy budynek, zlokalizowany w miejscu dawnego parkingu, jak również zidentyfikować drzewa, które zostały wycięte podczas jego budowy (lewy dolny róg rysunku 5a). Na dachach dwóch pozostałych budynków można zauważyć przewody wentylacyjne zamontowane podczas remontu obiektów.

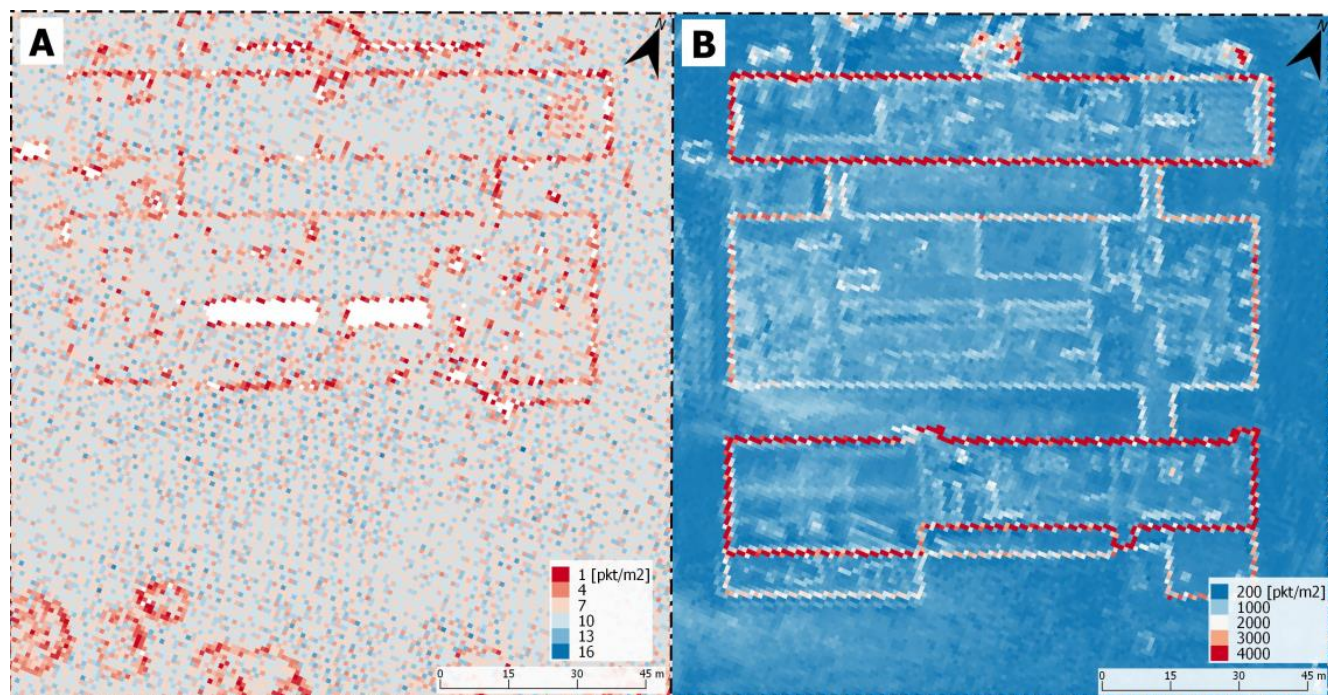
NMPT stworzony na podstawie zdjęć pozyskanych z pokładu BSP (rys. 5b) z dużo większą szczegółowością odwzorowuje powierzchnię terenu, niż dane pozyskane metodą LiDAR (między innymi murki okalające dachy są widoczne jedynie na rysunku 5b).



Rys. 2. Rzut izometryczny chmury punktów przedstawiającej fragment obszaru opracowania, stworzony na podstawie zdjęć wykonanych z pokładu bezzałogowego statku powietrznego



Rys. 3. Zdjęcie ukośne wykonane z pokładu bezzałogowego statku powietrznego, przedstawiające fragment obszaru opracowania



Rys. 4. Przestrzenny rozkład gęstości chmury punktów: a) pozyskanych metodą LiDAR, b) stworzonych na podstawie zdjęć wykonanych z pokładu bezzałogowego statku powietrznego. Źródło: Dane CODGiK oraz opracowanie własne



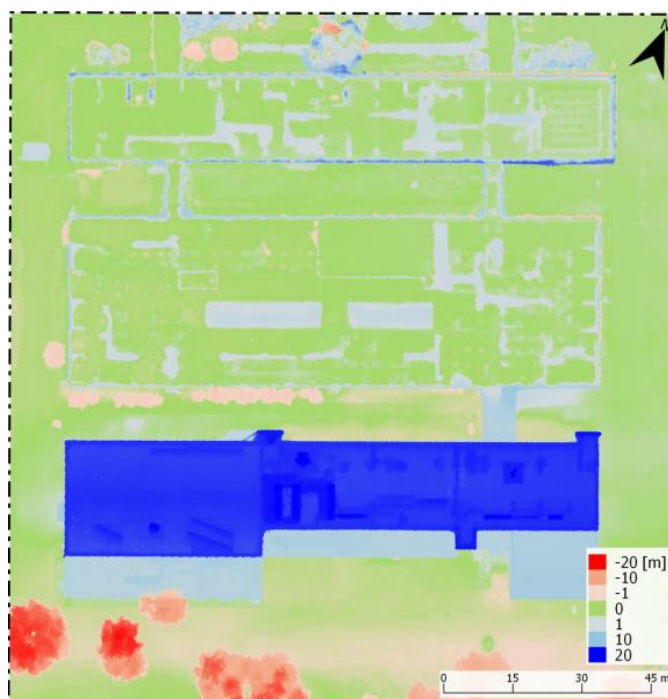
Rys. 5. Numeryczny Model Pokrycia Terenu obszaru objętego opracowaniem: a) stworzona na podstawie danych LiDAR – stan na rok 2012, b) stworzona na podstawie zdjęć wykonanych z pokładu bezzałogowego statku powietrznego – stan na rok 2016. Źródło: Dane CODGiK oraz opracowanie własne

W celu oceny dokładności pozyskanych danych wysokościowych przeanalizowano przestrzenny rozkład różnicy wysokości NMPT opracowanego na podstawie zdjęć wykonanych z pokładu bezzałogowego statku powietrznego oraz NMPT opracowanego na podstawie danych LiDAR (rys. 6). Analiza potwierdza przytoczone wcześniej spostrzeżenia że uwidoczniło się nowe powstałe obiekty oraz detale niezarejestrowane metodą LiDAR (odcienie niebieskiego), jak również elementy, które zniknęły z badanego obszaru (odcienie czerwonego).

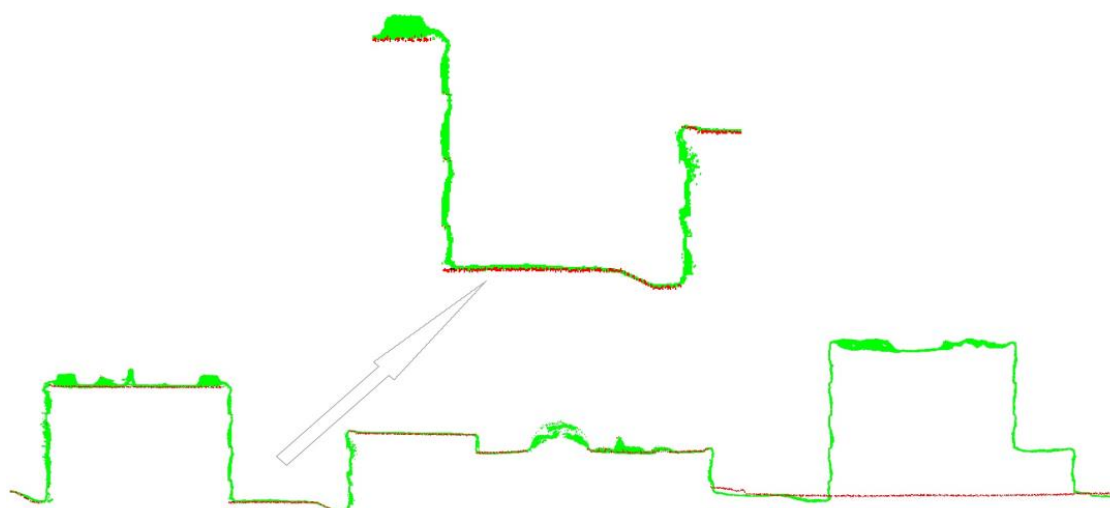
Ocena jakości dopasowania na podstawie średniej różnicy wysokości pomiędzy modelami, z uwagi

na istotne zmiany jakie zaszły w zagospodarowaniu terenu, byłoby niemiernodajna. Średnia różnica wysokości pomiędzy modelami, na obszarach które nie uległy przekształceniu, wynosi około 18 cm.

Przekrój przez chmury punktów (rys. 7) pozwala zauważyć zadowalający stopień dopasowania produktów pozyskanych porównywanymi metodami. Dodatkowo, należy zwrócić uwagę na wyraźnie większą liczbę punktów zarejestrowanych na elewacjach budynków w chmurze stworzonej na podstawie zdjęć wykonanych z pokładu Bezzałogowego Statku Powietrznego.



Rys. 6. Rozkład przestrzenny różnicy wysokości NMPT opracowanego na podstawie zdjęć wykonanych z pokładu bezzałogowego statku powietrznego oraz NMPT opracowanego na podstawie danych LiDAR. Źródło: Opracowanie własne z wykorzystaniem danych CODGiK



Rys. 7. Przekrój fragmentu chmur punktów z obszaru objętego opracowaniem (kolor czerwony – punkty pozyskane metodą LiDAR, kolor zielone – punkty stworzone na podstawie zdjęć wykonanych z pokładu bezzałogowego statku powietrznego). Źródło: Opracowanie własne z wykorzystaniem danych CODGiK

5. Wnioski

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że dane pozyskane z wykorzystaniem niemetrycznej kamery zintegrowanej z popularnym modelem Bezzałogowego Statku Powietrznego mogą być wykorzystane do wygenerowania trójwymiarowej chmury punktów oraz Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu z wykorzystaniem algorytmów do automatycznej orientacji i korelacji wielu zdjęć. Porównanie z danymi pozyskanymi metodami tradycyjnymi dało satysfakcjonujące wyniki, wykazując dużą zgodność pomiędzy porównywanymi modelami.

Zobrazowania pozyskane z wykorzystaniem kamery niemetrycznej mogą być istotnym uzupełnieniem materiałów pochodzących z pomiarów geodezyjnych i fotogrametrycznych, jak również stanowić podstawę do tworzenia samodzielnych opracowań inżynierskich. Większa gęstość chmury punktów charakteryzująca się większą szczegółowością niż dane LiDAR, pozwala na identyfikację większej liczby detali analizowanego obszaru.

Istotnym atutem wykorzystanego rozwiązania jest niska cena zakupu platformy oraz jej późniejszej eksploatacji. Pozwala to na częstą aktualizację istniejących zbiorów danych przestrzennych oraz inwentaryzację zmian, które zaszły od czasu wykonania poprzednich pomiarów. Jednak rozwiązanie jest uzasadnione ekonomicznie do pozyskiwania wysokorozdzielczych danych obejmujących jedynie małe obszary.

Literatura

Agisoft (2016). Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.2. Agisoft LLC. www.agisoft.com [dostęp: 16.02.2017].

Bujakiewicz A., Preuss R. (2016). Wieloźródłowe dane fotogrametryczne dla tworzenia 3D modeli miast. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.

CODGiK (2017). Numeryczne Dane Wysokościowe. Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej. www.codgik.gov.pl/index.php/zasob/numeryczne-dane-wysokosciowe.html [dostęp: 16.02.2017].

Kędzierski M., Fryśkowska A., Wierzbicki D. (2014). Opracowania fotogrametryczne z niskiego pułapu. M. Kędzierski (red.), Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa.

Phantom 3 (2015). Advanced. Instrukcja obsługi v1.0.

Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR (2014). P. Wężyk (red.), Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa.

UCL (2013). Bezzałogowe statki powietrzne w Polsce. Raport o aktualnym stanie prawnym odnoszącym się do bezzałogowych statków powietrznych (Raport otwarcia). Urząd Lotnictwa Cywilnego, Zespół do spraw bezzałogowych statków powietrznych, Warszawa. www.ulc.gov.pl/_download/publikacje/_UAV_raport_ULC_2013.pdf, [dostęp: 16.02.2017].

LOW-COST, UNMANNED AERIAL VEHICLE WITH NON-METRIC CAMERA AS A SOURCE OF ELEVATION DATA

Abstract: The aim of the study was to assess the potential of nonmetric camera placed at the unmanned aerial vehicle as a source of elevation data. In the study the popular model of remote-controlled quadcopter was used. The acquired imaging were processed to three-dimensional point cloud, which was next compared with the LiDAR data collected in the project ISOK.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy numer MB/WBiS/13/2016

WPLYW OSADU ŚCIEKOWEGO NA AKTYWNOŚĆ BIOLOGICZNĄ GLEB

Urszula WYDRO*, Elżbieta WOŁEJKO, Agata JABŁOŃSKA-TRYPUĆ,
Andrzej BUTAREWICZ, Tadeusz ŁOBODA

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Celem pracy było określenie wpływu granulatu na bazie osadu ściekowego na aktywność biologiczną gleb miejskich. Czynnikiem eksperymentu były: dawka osadu ściekowego „Granbial” i termin poboru próbek. W próbkach gleb oznaczono takie parametry jak: ogólna liczba bakterii (bez promieniowców), promieniowców i grzybów, aktywność dehydrogenaz, zawartość substancji organicznej oraz pH gleby w 1M KCl. Aktywność mikrobiologiczną określono poprzez wyznaczenie stosunku liczby bakterii (obejmującej również promieniowce) do liczby grzybów. Oznaczenie aktywności dehydrogenaz posłużyła do oceny enzymatycznej gleb. Wyznaczony iloraz liczebności bakterii do grzybów wskazuje na mały udział grzybów w badanych glebach. Aktywność biologiczna gleb miejskich jest składową warunków meteorologicznych, glebowych oraz działalności człowieka.

Słowa kluczowe: osady ściekowe, aktywność biologiczna gleb.

1. Wprowadzenie

Gleby miejskie stanowią najmniej poznaną grupę gleb na terenach Polski (Niedbała i in., 2010). Należą do gleb zdegradowanych ze względu na niską zawartość substancji organicznej i próchnicy, niską pojemność wodną oraz niską zawartość składników pokarmowych, które są niezbędne do wzrostu roślin. Struktura tych gleb jest zróżnicowana, nie wykazują one budowy profilowej. Często budują je odpady budowlane, co powoduje, że mają zbitą strukturę, są nieprzepuszczalne dla wody oraz wykazują zasadowy odczyn (Grejnert, 2000; Wołejko i in., 2015). Ponadto, grunty miejskie zlokalizowane wzdłuż ciągów komunikacyjnych narażone są na zanieczyszczenia, których głównym źródłem jest transport. Emituje on szereg groźnych związków, takich jak metale ciężkie czy substancje organiczne, będące produktami spalania ropy naftowej (Gawroński, 2009; Czaja i in., 2013). Wszystkie wymienione czynniki powodują, że gleby na terenach zurbanizowanych nie spełniają w pełni swojej funkcji ekologicznej, a także nie stwarzają sprzyjającego środowiska do życia dla mikroorganizmów czy też roślin, a w związku z tym wymagają rekultywacji (Czaja i in., 2013).

Zabieg rekultywacji gleb zdegradowanych może być prowadzony przy użyciu odpadów organicznych, do których należą także osady ściekowe. Jest to materiał organiczny wykazujący korzystne właściwości glebo- i próchnicotwórcze, jest zasobny w substancję organiczną, mikro- i makroelementy niezbędne do wzrostu roślin oraz poprawiające aktywność biologiczną gleb. Wykorzystanie

przyrodnicze osadów ściekowych jest tym bardziej uzasadnione ze względu na problem utylizacji tego bioodpadu oraz brak możliwości jego składowania (Wołejko i in., 2015; Bień i in., 2011).

Ograniczeniem stosowania osadów ściekowych są najczęściej ponadnormatywne zawartości metali ciężkich, zanieczyszczenia sanitarne oraz takie właściwości osadu jak konsystencja czy nieprzyjemny zapach. Aby wyeliminować powyższe problemy, przeprowadza się proces stabilizacji termicznej osadów ściekowych poprzez suszenie połączone z granulacją. Technologia ta pozwala na uzyskanie produktu o dobrych parametrach użytkowych, to jest: niskiej wilgotności, wysokim stopniu higienizacji, właściwym uziarnieniu ułatwiającym procesy przechowywania, załadunku, transportu i wysiewu, wysokiej wytrzymałości mechanicznej ograniczającej pylenie, a także pozbawionego charakterystycznego dla osadów ściekowego odor (Wiater i in., 2003).

Celem pracy było określenie wpływu granulatu otrzymanego na bazie osadu ściekowego na aktywność biologiczną gleb miejskich, wyrażoną wybranymi parametrami mikrobiologicznymi, enzymatycznymi i chemicznymi.

2. Materiały i metody

2.1. Założenie eksperymentu

Badania przeprowadzono na powierzchniach doświadczalnych założonych na trawnikach miejskich, zlokalizowa-

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: u.wydro@pb.edu.pl

nych wzdłuż ciągów komunikacyjnych przy ul. Hetmańskiej i ul. ks. Jerzego Popiełuszki w Białymstoku, założonych jesienią 2014 roku. Każda z powierzchni miała 90 m² i została podzielona na 18 poletek o powierzchni 5 m².

Czynnikami w eksperymencie były: dawka granulatu na bazie osadu ściekowego „Granbial”, pochodzącego z Miejskiej Oczyszczalni ścieków w Białymstoku (0 – kontrola, 14,5 i 29 Mg s.m./ha), nawożenie solą potasową (0 i 1 kg/100 m²) oraz termin poboru próbek (lipiec i wrzesień 2015 roku). Zastosowany granulat spełniał wymogi ujęte w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. Nr 137 poz. 924) w przypadku zastosowania osadów do celów nierolniczych. Właściwości granulatu przedstawiają się następująco: pH – 8,2; azot amonowy: 0,18% s.m.; azot ogólny – 4,63% s.m.; fosfor ogólny – 3,26% s.m.; wapń – 3,79% s.m.; magnez – 0,57% s.m.; ołów – 26 mg/kg s.m.; chrom – 76,6 mg/kg s.m.; cynk – 1045 mg/kg s.m.; kadm – <1,25 mg/kg s.m.; miedź – 198 mg/kg s.m.; nikiel – 30,1 mg/kg s.m.; rtęć – 0,98 mg/kg s.m.; zawartość substancji organicznych – 56,9% s.m.; zawartość suchej masy – 81,7%. W osadzie nie wyizolowano żywych jaj pasożytów jelitowych *Ascaris sp.*, *Trichuris sp.* i *Toxocara sp.*, ani bakterii z rodzaju *Salmonella*.

Wiosną 2015 roku na przygotowane obiekty wysiano mieszkankę traw gazonowych Roadside.

2.2. Oznaczenie właściwości fizykochemicznych, mikrobiologicznych i enzymatycznych gleb

Analizy próbek gleby przeprowadzono w Zakładzie Biologii Sanitarnej i Biotechnologii oraz w Katedrze Kształtowania i Ochrony Środowiska Politechniki Białostockiej. W próbkach gleby pobranej w lipcu i we wrześniu 2015 roku z warstwy powierzchniowej 0-10 cm oznaczono:

- pH w 1M KCl metodą potencjometryczną na pehametrze HQ 40d Multi firmy Hach;
- straty przy prażeniu suchej masy gleby jako zawartość substancji organicznej po spalaniu próbki w piecu mufowym w temperaturze 550°C;
- aktywność dehydrogenaz metodą kolorymetryczną z wykorzystaniem TTC (2,3,5-trifenylotetrazoliowego chlorku) jako substratu po 20 h inkubacji w 37°C przy długości fali 485 nm (Casida i in., 1964) wykorzystując czytnik mikropłytek GloMax®-Multi Detection System firmy Promega;
- ogólną liczbę bakterii na podłożu z wyciągiem glebowym (Galimska-Stypa i in., 1999) po inkubacji w temperaturze 28°C przez 7 dni;
- liczbę grzybów pleśniowych na podłożu Martina z różem bengalskim (Martin, 1950) i dodatkiem streptomycyny, po inkubacji w tempurze 25°C przez 14 dni;
- liczbę promieniowców na podłożu AGS z glicerolem i arginina (El-Nakeeb i Lechevalier, 1963)

z dodatkiem nystatyny i cykloheksamidu po inkubacji w temperaturze 28°C przez 10 dni.

Wszystkie oznaczenia wykonano w trzech powtórzeniach. Ogólną liczbę bakterii (z wyłączeniem promieniowców), grzybów i promieniowców przeliczono na 1 g s.m. gleby i wyrażono w jednostkach tworzących kolonie (jtk).

Aktywność mikrobiologiczną określono poprzez wyznaczenie ilorazu liczby bakterii (w tym promieniowców) (B) do liczby grzybów (G), oznaczenie aktywności dehydrogenaz (DHA) wyrażonej ilością powstałego 2,3,5-trifenyloformazanu (μg TPF/20 h x g s.m. gleby) posłużyło do oceny enzymatycznej gleb.

2.3. Analiza statystyczna

Uzyskane wyniki poddano podstawowej analizie statystycznej stosując pakiet STATISTICA 12. Ponadto określono wpływ dawki osadu i terminu poboru próbek na parametry aktywności biologicznej stosując analizę wariancji ANOVA, a istotne różnice oceniono testem Tukey’a przy poziomie istotności $p < 0,05$.

3. Analiza wyników badań

Z danych przedstawionych w tablicy 1 wynika, że zastosowane nawożenie osadem ściekowym w różnych dawkach wpłynęło na zróżnicowanie właściwości badanych gleb. Odczyn gleb mierzony w 1 M KCl wynosił od 6,80 dla obiektów z podwójną dawką osadów ściekowych do 7,26 dla poletek kontrolnych, co oznacza że gleby posiadały odczyn od słabo do średnio alkalicznego. Cechą charakterystyczną gleb na terenach miejskich jest często zasadowy odczyn, który jest powodowany emisją zanieczyszczeń z powietrza o charakterze zasadowym oraz faktem, że gleby miejskie są najczęściej tworzone z odpadów budowlanych zawierających związki wapnia (Grejnert, 2000). Ponadto, aplikowany do gleby granulat miał wartość pH wynoszącą 8,2. Wong i in. (1998), Singh i Agrawal (2008) oraz Napora i Grobelak (2014) wskazują, że aplikacja osadu ściekowego do gleby może powodować modyfikację jej odczynu poprzez jego podwyższenie lub obniżenie na skutek obecności w osadach związków wapnia czy też produkcji kwasów podczas rozkładu materii organicznej wprowadzanej wraz z osadem.

Zawartość substancji organicznej oznaczonej jako straty przy prażeniu dla obiektów kontrolnych wynosiła od 3,83 do 6,93% s.m., średnio 5,28% s.m. (tab. 1). Nawożenie granulem spowodowało wzrost średniej zawartości substancji organicznej o 22% przy zastosowaniu dawki 14,5 Mg s.m./ha, z kolei nawożenie dawką podwójną – o 53% w stosunku do próbek kontrolnych. O pozytywnym wpływie osadu ściekowego na zawartość substancji organicznej w glebie donoszą Napora i Grobelak (2014), Singh i Agrawal (2008), Siuta (2003), Wiater i in. (2003).

Tab. 1. Odczyn gleby, zawartość substancji organicznej oraz aktywność dehydrogenaz w zależności od zastosowanej dawki osadu ściekowego w formie granulatu (źródło: opracowanie własne)

Dawka granulatu [Mg s.m./ha]	Parametr	pH	Zawartość substancji organicznej [%]	Aktywność dehydrogenaz [μg TPF/20 h x g s.m. gleby]
0	Średnia	–	5,28	0,26
	Min-max	7,05-7,26	3,83-6,93	0,10-0,37
	Odchylenie standardowe	–	1,04	0,09
14,5	Średnia	–	6,42	0,35
	Min-max	6,89-7,34	5,66-7,65	0,06-0,45
	Odchylenie standardowe	–	0,66	0,12
29	Średnia	–	8,09	0,27
	Min-max	6,80-7,12	6,16-11,26	0,06-0,44
	Odchylenie standardowe	–	1,52	0,11

Przydatnym wskaźnikiem do oceny aktywności mikrobiologicznej gleby w obecności zanieczyszczeń jest określenie aktywności dehydrogenaz, które wyrażają intensywność metabolizmu oddechowego mikroorganizmów glebowych, głównie bakterii (Rusek, 2006; Brzezińska i Włodarczyk, 2005).

Aplikacja granulatu na bazie osadu ściekowego w pierwszym roku prowadzenia badań nie wpłynęła znacząco na aktywność dehydrogenaz (tab. 1). Aktywność tych enzymów wynosiła średnio od 0,26 do 0,35 μg TPF/20 h x g s.m. gleby, odpowiednio dla próbek z poletek kontrolnych i próbek nawożonych dawką 14,5 Mg s.m./ha. Maksymalną aktywność uzyskano dla próbek z obiektów z pojedynczą dawką granulatu (0,45 μg TPF/20 h x g s.m.). Uzyskane wyniki aktywności enzymatycznej gleb wyrażonej aktywnością dehydrogenaz w badaniach własnych nie potwierdzają wpływu osadu ściekowego na ten parametr. Aktywność enzymatyczna gleb na terenach zurbanizowanych może być dodatkowo determinowana zanieczyszczeniami trafiającymi do środowiska glebowego z powietrza oraz emitowanymi przez transport. Ponadto aplikowany osad, zwłaszcza w podwójnej dawce, mógł w początkowym okresie badań doprowadzić do zahamowania aktywności

mikrobiologicznej gleby na skutek nagłej zmiany warunków siedliskowych powodując stres.

Niezwyczajnie ważnym elementem gleby są zamieszkujące ją drobnoustroje, których funkcją jest regulacja w ekosystemie obiegu składników pokarmowych (Vieira i Pazianotto, 2016). Badania własne wykazały, że aplikacja granulatu „Granbial” zróżnicowała liczbę drobnoustrojów w badanym środowisku glebowym. Stwierdzono istotny wpływ dawki osadu na liczbę bakterii (w tym promieniowców). Na ich liczbę miał też wpływ termin poboru próbek (tab. 2). Najniższą liczebność omawianych mikroorganizmów odnotowano dla próbek pobranych latem (w lipcu) dla poletek kontrolnych i wynosiła ona średnio $1,16 \times 10^6$ jtk/ g s.m., natomiast najwyższą – dla próbek pobranych we wrześniu z obiektów nawożonych dawką 29 Mg s.m./ha, wynoszącą $9,24 \times 10^6$ jtk/ g s.m. Liczebność grzybów pleśniowych w badanych glebach różniła się istotnie w zależności od terminu poboru próbek i wynosiła średnio od 377 jtk/ g s.m. do 1569 jtk/ g s.m., odpowiednio dla próbek pobranych z kontroli w okresie letnim i z obiektów z dawką 14,5 Mg/ha s.m. w okresie jesiennym.

Tab. 2. Ogólna liczba bakterii (wraz z promieniowcami) oraz grzybów oraz ich stosunek w zależności od dawki granulatu i terminu poboru próbek (źródło: opracowanie własne)

A - Dawka osadów ściekowych [Mg s.m.]/ha	B - Termin poboru próbek	Liczba bakterii (B) [jtk x 10 ⁶ /g s.m.]	Liczba grzybów (G) [jtk/g s.m.]	B+P/G
0	lato	1,16	377	3076
	jesień	3,78	1105	3420
14,5	lato	2,28	528	4320
	jesień	7,71	1569	4911
29	lato	4,72	1033	4566
	jesień	9,24	1357	6809
NIR _{0,05}		A - 6,0; B - 3,55; AxB - n.i.* A - n.i.; B - 892; AxB - n.i.		

* Objaśnienia: n.i. – nieistotne statystycznie.

Napora i Grobelak (2014) zwracają uwagę na fakt, iż osady ściekowe mają pozytywny wpływ na rozwój glebowych bakterii ponieważ po aplikacji osadów bogatych w substancję organiczną i składniki pokarmowe zwiększa się ilość bakterii zwłaszcza makrotróficznych (o dużych wymaganiach pokarmowych) i oligotróficznych (o małych wymaganiach pokarmowych) w wierzchniej warstwie. Dodatkowo, mikroorganizmy glebowe przekształcając związki mineralne i organiczne, powodują wzbogacenie gleby w substancje antybiotyczne, wzrostowe i biologicznie czynne (Janvier i in., 2007). Warto dodać, że dodany do gleb osad ściekowy może modyfikować aktywność mikrobiologiczną gleb i strukturę występowania poszczególnych grup drobnoustrojów (Jorge-Mardomingo i in., 2013).

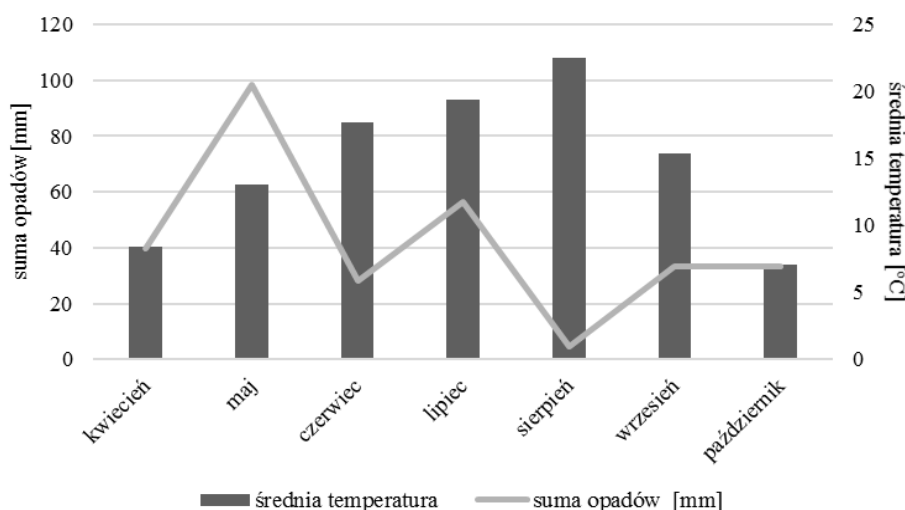
Jak wskazuje Skwaryło-Bednarska (2008) i Wyszkowska (2002), jednym ze wskaźników określających jakość, żyzność i aktywność biologiczną gleb jest iloraz liczebności bakterii (w tym promieniowców) do liczebności grzybów. W badaniach własnych uzyskany wskaźnik był różnicowany i wynosił od 3076 (dla próbek z kontroli pobranych latem) do 6809 (dla próbek z poletek z dawką podwójną osadu pobranych jesienią). Tak wysoki wskaźnik występowania badanych grup drobnoustrojów świadczy o słabym rozwoju grzybów w badanych glebach. Jak podaje Sosnowski i Jankowski (2013) duży udział grzybów nie jest zjawiskiem pożądanym z punktu widzenia jakości gleb, ponieważ grzyby mogą wykazywać toksynotwórcze i fitopatogenne działanie. Jednak jak donosi Tyszkiewicz (2014), grzyby pełnią również pożyteczną rolę w glebie, a mianowicie biorą udział w przemianie związków organicznych i mineralnych, w syntezie substancji organicznej i biologicznie czynnych związków, decydując tym samym o kierunku procesów glebotwórczych.

O rozwoju mikroorganizmów w glebie decyduje wiele czynników, takich jak: warunki meteorologiczne, wilgotność gleby, obecność składników odżywczych, temperatura czy odczyn gleby (Galus-Barchan

i Paśmionka, 2014). Konsekwencją mechanicznych i chemicznych przekształceń środowiska glebowego w miastach jest zaburzenie działalności i dynamiki rozwoju drobnoustrojów obecnych w glebie i związanej z tym aktywności biologicznej (Abdu i in., 2017; Wysocki i Stawicka, 2005). Ze względu na charakter gleb miejskich, wysoki stopień ich zdegradowania oraz brak zabiegów agrotechnicznych poprawiających ich jakość, kształtowanie się struktur ilościowo-jakościowych zbiorowisk mikroflory glebowej ma zupełnie inny charakter niż na glebach użytkowanych rolniczo. Ponadto, tempo rozkładu materii organicznej w glebach miejskich, decydujące o intensywności rozwoju mikroflory, jest zależne od stopnia antropizacji i na obszarach zieleni przyulicznej proces ten jest wyraźnie wolniejszy niż w parkach (Wysocki i Stawicka, 2005).

Kolejnym z parametrów mających duży wpływ na rozwój mikroorganizmów w glebie jest jej odczyn. Bakterie najlepiej znoszą pH od 6,5 do 7,5 (Galus-Barchan i Paśmionka, 2014), z kolei grzyby pleśniowe rozwijają się w glebie o pH niższym. Badane środowisko glebowe charakteryzuje się stosunkowo wysokim odczynem gleb (tab. 1), w związku z tym rozwój grzybów może być ograniczony, co wyjaśniać może wyliczony wskaźnik B/G.

Można przypuszczać, że warunki meteorologiczne badanego obszaru, w okresie kiedy pobierane były próbki, również miały wpływ na kształtowanie się mikroflory glebowej. Od lipca do października 2015 roku na terenie Białegostoku odnotowano niskie sumy opadów deszczu (lipiec: 56 mm, sierpień: 4 mm, wrzesień: 33 mm), którym towarzyszyła wysoka średnia temperatura powietrza (lipiec: 19°C, sierpień: 22°C, wrzesień: 15°C) (rys. 1). Jurkowski i Błaszczyk (2012) podają, że poszczególne grupy mikroorganizmów wzrastają w określonej temperaturze i wilgotności, przy której następuje wydajne prowadzenie procesów metabolicznych. Ponadto parametry te wpływają na intensywność wzrostu oraz wydzielanie enzymów.



Rys. 1. Średnia miesięczna temperatura oraz suma opadów w Białymstoku w okresie wegetacyjnym 2015 roku (opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych ze stacji meteorologicznej Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej)

Podsumowując, środowisko glebowe na terenach zurbanizowanych charakteryzuje się specyficznymi warunkami siedliskowymi nie tylko dla roślin, ale również mikroorganizmów bytujących w glebie. Nawożenie osadem ściekowym w formie granulatu spowodowało zmiany niektórych parametrów chemicznych i mikrobiologicznych. Jak donoszą Frączak (2010) i Tyszkiewicz (2014), każda zmiana warunków w glebie wpływa na stosunki biotyczne panujące między mikroorganizmami. W związku z tym, drobnoustroje glebowe są uważane za składnik biocenozy najbardziej podatny na zmiany parametrów środowiska.

4. Wnioski

- Nawożenie granulatem na bazie osadów ściekowych „Granbial” wpłynęło pozytywnie na wzrost substancji organicznej w glebie.
- Dostarczony do gleby osad ściekowy nie wpłynął na wzrost aktywności dehydrogenaz w badanych glebach.
- Granulowany osad ściekowy wpłynął na wzrost liczebności bakterii i promieniowców. O liczebności grzybów pleśniowych decydował przede wszystkim termin poboru próbek gleby.
- Wyznaczony iloraz liczebności bakterii do grzybów wskazuje na mały udział grzybów w badanych glebach.
- Aktywność biologiczna gleb miejskich jest składową warunków meteorologicznych, glebowych oraz działalności człowieka.

Literatura

- Abdu N., Abdullahi A.A., Abdulkadir A. (2017). Heavy metals and soil microbes. *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 15, 65-84.
- Bień J., Neczaj E., Worwąg M., Grosser A., Nowak D., Milczarek M., Janik M. (2011). Kierunki zagospodarowania osadów w Polsce po roku 2013. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, Vol. 14, No. 4, 375-384.
- Brzezińska M., Włodarczyk T. (2005). Enzymy wewnątrzkomórkowych przemian redoks (okydoreduktazy). *Acta Agrophysica, Rozprawy i Monografie*, Vol. 3, 11-26.
- Casida L.E. Jr., Klein D.A., Santoro T. (1964). Soil dehydrogenase activity. *Soil Science*, Vol. 98, 371-376.
- Czaja M., Kołton A., Baran A. (2013). Właściwości chemiczne gleb z terenów miejskich na początku okresu wegetacyjnego. *Logistyka*, No. 4, 59-65.
- El-Nakeeb M.A., Lechevalier H.A. (1963). Selective isolation of aerobic Actinomycetes. *Applied Microbiology*, Vol. 11, No. 2, 75-77.
- Frączek K. (2010). Skład mikrobiocenotyczny drobnoustrojów biorących udział w procesach przemian azotu w glebie w otoczeniu składowiska odpadów komunalnych. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, Vol. 10, No. 2(30), 61-71.
- Galimska-Stypa R., Małachowska-Jutcz A., Mrozowska J., Zabłocka-Godlewska, E. (1999). J. Mrozowska (red.) Laboratorium z Mikrobiologii Ogólnej i Środowiskowej.. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.
- Galus-Barchan A., Paśmionka I. (2014). Występowanie wybranych mikroorganizmów w glebie na obszarze Puszczy Niepołomickiej ze szczególnym uwzględnieniem grzybów pleśniowych. *Polish Journal of Agronomy*, Vol. 17, 11-17.
- Gawroński S.W. (2009). Fitoremediacja a tereny zieleni. *Zielen Miejska*, 10/2009, 28-29.
- Greinert A. (2000). Ochrona i rekultywacja terenów zurbanizowanych. *Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej*, Zielona Góra.
- Janvier C., Villeneuve F., Alabouvette C., Edel-Hermann V., Mateille T., Steinberg C. (2007). Soil health through soil disease suppression: Which strategy from descriptors to indicators? *Soil Biology & Biochemistry*, Vol. 39, 1-23.
- Jorge-Mardomingo I., Soler-Rovira P., Casermeiro M.A., de la Cruz M.T., Polo A. (2013). Seasonal changes in microbial activity in a semiarid soil after application of a high dose of different organic amendments. *Geoderma*, Vol. 206, 40-48.
- Jurkowski M., Błaszczyk M. (2012). Charakterystyka fizjologiczno-biochemiczna bakterii fermentacji mlekowej. *Kosmos. Problemy nauk biologicznych*, Vol. 61, No. 3, 493-504.
- Martin J.P. (1950). Use of acid, rose bengal and streptomycin in the plate method for estimating soil fungi. *Soil Science*, Vol. 69, 215-232.
- Napora A., Grobelak A. (2014). Wpływ osadów ściekowych na aktywność mikrobiologiczną i biochemiczną gleby. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, Vol. 17, No. 4, 619-630.
- Niedbała M., Smolińska B., Król K. (2010). Zanieczyszczenia gleb miejskich miasta Łodzi wybranymi pierwiastkami śladowymi. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. Chemia Spożywcza i Biotechnologia*, No. 74, 29-38
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz. U. Nr 137 poz. 924).
- Rusek A. (2006). Aktywność dehydrogenaz w glebie zanieczyszczonej olejem napędowym w polowym doświadczeniu lizymetrycznym. *Roczniki gleboznawcze*, No 3/4, 106-116.
- Singh R.P., Agrawal M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, Vol. 28, 347-358.
- Siuta J. (2003). Uwarunkowania i sposoby przyrodniczego użytkowania osadów ściekowych. W: *Inżynieria Ekologiczna: Rekultywacyjne i nawozowe użytkowanie odpadów organicznych*, Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski, Warszawa
- Skwaryło-Bednarska B. (2008). Ocena właściwości biologicznych gleby pod uprawą szarłat (*Amaranthus cruentus* L.). *Acta Agrophysica*, Vol. 12, No. 2, 527-534.
- Sosnowski J., Jankowski K. (2013). Ocena liczebności mikroorganizmów glebowych spod uprawy mieszanek *Festulolium braunii* z roślinami motylkowatymi nawożonych zróżnicowanymi dawkami azotu. *Fragmenta Agronomica*, Vol. 30, No. 4, 129-137.
- Tyszkiewicz Z. (2014). Zróżnicowanie zbiorowisk grzybów wybranych gleb odwodnionych siedlisk bagiennych w dolinie rzeki Biebrzy. *Inżynieria Ekologiczna*, Vol. 40, 55-64.
- Vieira R.F., Pazianotto R.A. (2016). Microbial activities in soil cultivated with corn and amended with sewage sludge. *SpringerPlus*, Vol. 5, 1844.
- Wiater J., Łukowski A., Fitko H., Stelmach S., Sobolewski A., Figa J. (2003). Wstępne badania aplikacyjne granulowanych nawozów organiczno-mineralnych na bazie osadów ściekowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Inżynieria Środowiska*, Vol. 16, No. 2, 233-237.

- Wołejko E., Wydro U., Łoboda T. (2015). Zmiany liczebności wybranych mikroorganizmów w strefie ryzosferowej traw po aplikacji osadu ściekowego. W: *Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska*. Wiśniewski J., Kutylowska M., Trusz-Zdybek A. (Ed.), Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Wong J.W.C., Lai K.M., Fang M., Ma K.K. (1998). Effect of sewage sludge amendment on soil microbial activity and nutrient mineralization. *Environment International*, Vol. 24, No. 8, 935-943.
- Wysocki C., Stawicka J. (2005). Trawy na terenach zurbanizowanych. *Łąkarstwo*, No. 8, 227-236.
- Wyszkowska J. (2002). Biologiczne właściwości gleb zanieczyszczonych chromem sześciowartościowym. *Rozprawy i monografie. Wydawnictwo UWM Olsztyn*, Olsztyn.

THE IMPACT OF SEWAGE SLUDGE ON A BIOLOGICAL ACTIVITY OF URBAN SOIL

Abstract: The aim of this study was to determine the effect of using of granular sewage sludge to fertilize lawn soil

in Białystok. The factors of the experiment were: a dose of the sewage sludge and the sampling time. In the soil samples total number of bacteria (without *Actinomycetes*), *Actinomycetes* and fungi, dehydrogenase activity, organic matter content and the soil pH in 1 M KCl were determined. The microbial activity was expressed by the ratio of the bacteria (with the *Actinomycetes*) number to the fungi. The dehydrogenase activity was used for assess of the soil enzymatic activity. The lowest ratio the number of the bacteria to fungi was from 3076 to 6809. The higher ratio of number bacteria to fungi shows smaller number of fungi, whose presence in the soil in large quantities is undesirable. The dehydrogenase activity ranged from 0.060 to 0.445 $\mu\text{mol TPF/g d.m.} \times 20 \text{ h}$. The organic matter content in the soil depended on the dose of sewage sludge and ranged from 3.83 to 11.26% d.m. The soil biological activity in urban soil depended on granules dose, soil pH, weather conditions, sampling time and human activity.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji pracy statutowej S/WBiIS/3/2015

Abstracts

Vol. 8 No. 2

Grzegorz KOWALEWSKI, Izabela KOSTECKA, Walery JEZIERSKI

Assessment of thermal comfort in the single-family residential building after its thermal-modernisation

The use of the parameters of fracture mechanics presents a new way of designing in civil engineering. Traditional The paper contains an assessment of the indoor thermal comfort in a single-family residential building after its thermal-modernisation. The building established in 1970 is located in Białystok at Cyprysowa street. Thermo-modernisation of the building was made according to the current requirements of thermal protection in year 2012. The thermo-modernization projects included additional insulation of external walls, ceiling, ceiling over unheated basement and replacement of windows, without change of heat source. Thermo-modernisation significantly changed the indoor comfort conditions in the building. Based on the data on the microclimate parameters in the building, the conditions of thermal comfort were analysed. The Fanger comfort assessment method using *PMV* and *PPD* indicators were used in the analysis. Significant improvements in comfort conditions were identified, which affected ambiguously the health of the inhabitants.

Kamil RAWSKI

Analysis of ventilating Białystok city

In cities with insufficient ventilation a tendency to excessive accumulation of pollutants in the air can be observed. In the paper, the area of Białystok city was analysed in terms of the air masses dynamics to evaluate the way of its air ventilation. Analyses were based on aerial photographs of the city detailing the following areas: with dominance of the processes of air regeneration, air ventilation and regeneration, boosting the exchange of air, with dominance of the processes of air ventilation, with dominance of air stagnation and those that impede the exchange of air. There were also discussed issues related to the spatial planning aimed at improving the function of ventilation system of the city.

Błażej SMOLIŃSKI

Installation of geotubes based on laboratory and field tests

The paper presents the process of installation of geotubes-synthetic containers, used for the construction and renovation of flood embankments, water damming and sludge dewatering. The article discusses the course of selected stages of research and field works carried out on a research field located on the bank of the Vistula rivier in Warsaw. To determine the geotechnical parameters characterizing of soil filling the geotubes and the strength parameters of geosynthetic shell, a systematically implemented researched program was presented. The technical aspects related to the possibilities of using geotubes in construction of flood embankment were analyzed.

Marcin SZKOBODZIŃSKI, Czesław MIEDZIAŁOWSKI

Comparative analysis of wind pressure on a building based on wind tunnel study, computer simulations and design standards

The paper aim is to determine the wind loads on buildings by means of computer simulation (CFD), wind tunnel measurements and their comparison to the standard guidelines. The basic range of the theory with CFD simulations and selected models of turbulence are described. Comparison of wind pressure factors received from: wind tunnel research, computer simulations and the standard guidelines is shown on two examples: building with a pitched roof and structure in the shape of a circular cylinder.

Michał TARGOŃSKI

Low-cost, unmanned aerial vehicle with non-metric camera as a source of elevation data

The aim of the study was to assess the potential of nonmetric camera placed at the unmanned aerial vehicle as a source of elevation data. In the study the popular model of remote-controlled quadrocopter was used. The acquired imaging were processed to three-dimensional point cloud, which was next compared with the LiDAR data collected in the project ISOK.

Urszula WYDRO, Elżbieta WOŁEJKO, Agata JABŁOŃSKA-TRYPUĆ, Andrzej BUTAREWICZ, Tadeusz ŁOBODA

The impact of sewage sludge on a biological activity of urban soil

The aim of this study was to determine the effect of using of granular sewage sludge to fertilize lawn soil in Białystok. The factors of the experiment were: a dose of the sewage sludge and the sampling time. In the soil samples total number of bacteria (without *Actinomycetes*), *Actinomycetes* and fungi, dehydrogenase activity, organic matter content and the soil pH in 1 M KCl were determined. The microbial activity was expressed by the ratio of the bacteria (with the *Actinomycetes*) number to the fungi. The dehydrogenase activity was used for assess of the soil enzymatic activity. The lowest ratio the number of the bacteria to fungi was from 3076 to 6809. The higher ratio of number bacteria to fungi shows smaller number of fungi, whose presence in the soil in large quantities is undesirable. The dehydrogenase activity ranged from 0.060 to 0.445 $\mu\text{mol TPF/g d.m.} \times 20 \text{ h}$. The organic matter content in the soil depended on the dose of sewage sludge and ranged from 3.83 to 11.26% d.m. The soil biological activity in urban soil depended on granules dose, soil pH, weather conditions, sampling time and human activity..