



**CIVIL AND
ENVIRONMENTAL
ENGINEERING**

**BUDOWNICTWO
I INŻYNIERIA
ŚRODOWISKA**



POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

BIAŁYSTOK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

CIVIL AND
ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

BUDOWNICTWO
I INŻYNIERIA
ŚRODOWISKA

Czasopismo jest kontynuacją Zeszytów Naukowych Politechniki Białostockiej
serii Budownictwo, wydawanych w latach 1983-2009.

redaktor naczelny z-ca redaktora naczelnego
editor-in chief editor
KATARZYNA ZABIELSKA-ADAMSKA RAFAŁ MIŁASZEWSKI

sekretarz / secretary
MARIA J. SULEWSKA

rada naukowa
editorial board

Grzegorz BAŁ (Poland), Stanisław BIEDUGNIS (Poland), Eugeniusz DEMBICKI (Poland), Lech J. DZIENIS (Poland), Maciej GRYZMAŃSKI (Poland), Jozef HULLA (Slovakia), Anatoli HURYNOVICH (Bielorus), Jerzy W. JASIEŃKO (Poland), Oleg KAPLIŃSKI (Poland), Czesław MIEDZIAŁOWSKI (Poland), Alexei PERVOV (Russia), Janusz R.RAK (Poland), Žymantas RUDŽIONIS (Lithuania), Sally A. SHOOP (USA), Sławomir A. SORKO (Poland), Leonas Ustinovičius (Lithuania), Dariusz WANATOWSKI (The United Kingdom-China), Józefa WIATER (Poland), Olena S. VOLOSHKINA (Ukraine)

REDAKCJA
BUDOWNICTWO I INŻYNIERIA ŚRODOWISKA

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

EDITORIAL OFFICE
CIVIL AND ENVIROMENTAL ENGINEERING

Faculty of Civil and Environmental Engineering
Bialystok University of Technology
Wiejska 45A Street
15-351 Bialystok

e-mail: biswbis@pb.edu.pl
www.biswbis.pb.edu.pl

© copyright by
Politechnika Białostocka Bialystok University of Technology

Białystok 2017

Nakład Circulation
150 egzemplarzy 150 copies

Skład i łamanie: Andrzej Leonczuk

Czasopismo publikuje artykuły
i komunikaty techniczne
z następującej tematyki:
budownictwo, inżynieria środowiska,
kształtowanie środowiska

Publikowane są także:
Raporty z konferencji, recenzje książek,
Materiały reklamowe

The journal accepts for publication papers
and technical notes tha describe
orginal works or ideas on:
Civil engineering, Enviromental engineering,
Environmental management.

Besides, it publishes:
reports of conferences and workshops,
book reviews, advertising materials.

Wytyczne dla autorów, streszczenia i artykuły
są dostępne na stronie www.biswbis.pb.edu.pl

Instructions to authors, abstracts and full papers
can be obtained from www.biswbis.pb.edu.pl

Spis treści

Jacek KARPIESIUK, Tadeusz CHYŻY

Wyniki wybranych badań wytrzymałościowych warstwy adhezyjnej grzejnika płaszczyznowego o lekkiej konstrukcji
The results of selected strength tests of the adhesive layer of radiant heater with lightweight construction 165

Marta KOSIOR-KAZBERUK, Rafał WASILCZYK

Analiza ugięć i zarysowania betonowych belek ze zbrojeniem niemetalicznym
Analysis of deflection and cracking of concrete beams with non-metallic reinforcement..... 173

Przemysław LAZAR

Budowa i analiza modelu numerycznego konstrukcji teoretycznego obiektu budowlanego
Construction and analysis of the numerical model of the theoretical building structure..... 185

Marzena MATEJCZYK, Aleksandra GOLONKO, Ewelina CHILMON

Aloe Vera – wybrane właściwości biologiczne
Aloe Vera – selected biological properties..... 191

Alona PEREBYNOS, Tetyana KRYVOMAZ

Biological deterioration of wooden structures of the Bialystok Open-air Museum 197

Olha SHEVCHUK, Oleksandr TKACHUK

Research of main analysis parameters of infiltration areas connecting to the storm drainage system..... 203

Abstracts Vol. 8 No. 4

Jacek KARPIESIUK, Tadeusz CHYŻY

The results of selected strength tests of the adhesive layer of radiant heater with lightweight construction

The paper presents the results of strength tests for lightweight radiant heater made in so called dry technology. One of its features is a very low thickness due to wet or dry screeds replaced by the fiberglass mesh structure with the adhesive cement. The research of pull-off, water absorption and frost resistance of the radiant heaters without the heat dissipating elements (heat diffusers) were carried out for the selected adhesives. The results confirm the complying with the conditions of applying insulation boards EPS and XPS in the adopted design of this radiant heater by using a fiberglass mesh, except applying it for protection against snow and ice.

Marta KOSIOR-KAZBERUK, Rafał WASILCZYK

Analysis of deflection and cracking of concrete beams with non-metallic reinforcement

The behaviour of model beams made of concrete with basalt reinforcing bars (BFRP) in three-point bending test was analysed. The strength parameters of BFRP bars were tested. The bending capacity, deformation of concrete and beam deflection were determined. The obtained results were compared with the results of the deflection calculation based on the ACI 440: 1R-06 standard. Crack propagation in the model beams under load was analysed using the Aramis 5M optical measuring system. Due to the strength characteristics of the composite reinforcing bars, the beams exhibited significant tensile strains, which resulted in the development of cracks of considerable width. A linear dependence of the model beam deflection versus load was observed. It has been found that the ACI 440: 1R-06 calculation procedure allows to determine deflections of beams reinforced with BFRP bars under short-term load.

Przemysław LAZAR

Construction and analysis of the numerical model of the theoretical building structure

The article presents the process of building and computational analysis of a multi-storey building model with a wall structure subjected to standard construction loads and mining effects of deformation of the substrate in the form of horizontal deformations of the mining substrate and the curvature of the convex mining area. The building modelling process and its computational analysis were made using the Autodesk Robot Structural Analysis software, which proved to be a useful tool for doing such work. On the basis of computational analysis, the importance of horizontal deformations of the ground substrate has been shown to cause damage to buildings located in mining areas.

Marzena MATEJCZYK, Aleksandra GOLONKO, Ewelina CHILMON

Aloe Vera – selected biological properties

Aloe as a folk medicine with comprehensive health-promoting properties has been known to humanity for hundreds of years. Aloe extracts are very popular among pharmacologists, medics and cosmetologists. It was demonstrated that the individual components of the aloe gel are antioxidants, stimulants of the immune system, have anti-cancer properties, lower blood sugar and lipid levels, and have a positive effect on wound healing, burns and anti-inflammatory effects. Recently, several significant papers have been published in which strong anti-cancer properties of selected aloe components have been demonstrated. Hence, the American Food and Drug Administration (FDA) has endorsed scientific research on the use of *A. vera* in the treatment of cancer and AIDS in humans. In the presented review, the general properties of Aloe are discussed, biological activity and the potential anti-cancer activity of the main, most active components of this plant are presented.

Alona PEREBYNOS, Tetyana KRYVOMAZ

Biological deterioration of wooden structures of the Bialystok Open-air Museum

The preliminary survey of the biodeterioration in the Bialystok open-air museum (Poland) shows that wooden buildings are in good condition and 92% of historical and architectural constructions were estimated to the second category of technical state. Buildings were examined to identify kinds of biological agents. The main biodeteriorations of wooden constructions were made by insects, lichens, algae films and colonies of microfungi. The comparison of the biodeterioration impact was made for the Bialystok open air museum and the skansen "Pyrogovo" (Ukraine). The probability of germination on the wooden structures of some species of fungi has been calculated taking into account the temperature conditions of the north-eastern region of Poland.

Olha SHEVCHUK, Oleksandr TKACHUK

Research of main analysis parameters of infiltration areas connecting to the storm drainage system

Infiltration areas with permeable pavements are one of the most effective modern methods of stormwater management on urban areas that permit accumulation of rainfall directly at place of precipitation. The paper justifies the expediency of inclusion of infiltration areas in the storm drainage system to ensure the effective stormwater management on urban areas. Thus, the aim of this paper is to calculate infiltration areas' basic parameters following the experimental and theoretical studies undertaken by authors. Based on these studies, a mathematical model of filling and emptying of base layer of infiltration areas by connecting them to the rain drainage systems is determined. As a result the formulae of calculation of the stormwater volume that detained on the infiltration areas, and the drainage discharges that came in the rain drainage system are received and verified. Moreover, obtained results permit to realize stormwater management on urban areas that depend on parameters of infiltration areas and pipe capacity of drainage system.

WYNIKI WYBRANYCH BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH WARSTWY ADHEZYJNEJ GRZEJNIKA PŁASZCZYZNOWEGO O LEKKIEJ KONSTRUKCJI

Jacek KARPESIUK*, Tadeusz CHYŻY

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

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki badań wytrzymałościowych lekkiego grzejnika płaszczyznowego wykonanego w tzw. technologii suchej. Jego cechą charakterystyczną jest mała grubość, ponieważ jastrzychy o mokrej i suchej konstrukcji zostały zastąpione cementową zaprawą klejową z wtopioną siatką z włókien szklanych. Badania przyczepności, nasiąkliwości i mrozoodporności wykonano w warstwie adhezyjnej odpowiednio dobranych klejów. Wyniki badań wytrzymałościowych potwierdzają możliwość stosowania płyt izolacyjnych EPS i XPS w przyjętej konstrukcji grzejnika złożonego z zaprawy klejowej z wtopioną siatką z włókna szklanego w zastępstwie podłóg z jastrzyczami. Rezultaty badań mrozoodporności wskazują również, że przyjęta konstrukcja eliminuje zastosowanie tego rodzaju grzejnika w systemach ochrony przed śniegiem i lodem.

Słowa kluczowe: lekki grzejnik płaszczyznowy, przyczepność, wytrzymałość na rozciąganie.

1. Wprowadzenie

W 2015 roku w Politechnice Białostockiej zostały wykonane badania eksperymentalne gęstości strumienia ciepła i bezwładności cieplnej lekkich, cienkich grzejników płaszczyznowych bez jastrzyczów i z jastrzyczami (Karpiesiuk, 2015), opisane przez Żukowskiego i Karpiesiuka (2015a i 2015b). Wyniki tych badań wyodrębniły wiele zalet układu grzejnego bez jastrzyczów, między innymi wykazały małą bezwładność cieplną, co skutkuje skróceniem okresów przegrzewania i niedogrzewania oraz wpływa na oszczędności energii. Dodatkowo należy zaznaczyć, że koszt takiej konstrukcji jest porównywalny do wykonania standardowego ogrzewania płaszczyznowego z gładziami betonowymi i można go zastosować przy rozwiązaniach modernizacji ogrzewania w przypadku stropów o niskiej nośności oraz w systemach wykorzystujących OZE (Odnawialne Źródła Energii). Badania grzejnika bez jastrzychu przeprowadzono bez rozpraszaczy ciepła (lameli), co miało wpływ na różnice temperatury na posadzce grzejnej do maksymalnie $\Delta T = 5^\circ\text{K}$, zależnie od temperatury wody zasilającej. Przeprowadzone badania określone były jako wstępne, z sugestią wykonania w przyszłości badań wytrzymałości mechanicznej tego typu płaszczyznowej konstrukcji grzejnej.

W artykule opisano wyniki badań przyczepności metodą pull-off oraz wytrzymałości po badaniu nasiąkliwości i mrozoodporności grzejnika płaszczy-

znowego bez zastosowania rozpraszaczy ciepła. Badania przeprowadzono na płytach izolacyjnych polistyrenu ekstrudowanego SYNTHOS XPS 30, powierzchnia typu „wafel” oraz na płytach polistyrenu ekspandowanego EPS 200 hydro Genderka bez lameli (tak zwana wersja ekonomiczna). Powierzchnie płyt izolacyjnych zostały pokryte zaprawą klejową. Na nim przymocowano płytki gresu o wymiarach zgodnych z wymaganiami norm do tego typu badań, czyli 5×5 cm. Do tego celu użyto klej cementowy Sika Ceram 255 klasy C2TES1 według normy PN-EN 12004+A1:2012 *Kleje do płytek. wymagania, ocena zgodności, klasyfikacja i oznaczenie*, w wariancie z siatką z włókna szklanego o gramaturze 335 g/m^2 i bez tej siatki. Klej tego typu charakteryzuje się przyczepnością $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ i odkształceniem poprzecznym $\geq 2,5 \text{ mm}$ i $< 5 \text{ mm}$. Zbadano siłę przyczepności, stosując płyty XPS z dostępną w sprzedaży powierzchnią gofrowaną (waflową) i płyty EPS (styropianowe). Przeprowadzono badania na płytach XPS o wymiarach $600 \times 1250 \text{ mm}$ i EPS o wymiarach $500 \times 1000 \text{ mm}$ z zamontowanymi węzownicami z PCV PE/RT/AI/PE/RT o średnicy $16 \times 2 \text{ mm}$ w rozstawie 10 cm (płyty XPS) i $12,5 \text{ cm}$ (płyty EPS). Całość zbadano na przyczepność zaprawy klejowej pomiędzy gresem i płytą izolacyjną przed osiągnięciem pełnego obciążenia, wynoszącego minimum 14 dni, a dokładnie po 3 dniach. Kolejne badania przeprowadzono po osiągnięciu pełnego obciążenia, w okresie od 28-31 dni. Wykonano też badania nasiąkliwości i mrozoodporności w cyklu

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: jack@elektra.pl

normowym 25-krotnym według normy PN-B 06250:1988 *Beton zwykły*, ponieważ jej wymagania są bardziej restrykcyjne niż normy badającej kleje. Dodatkowo zbadano siły rozciągające dla 50 cykli zamrażania i odmrażania, czyli o wartości 2-krotnie wyższej niż przewiduje norma PN-EN 1348: 2008 *Kleje do płytek. Oznaczenie przyczepności dla klejów cementowych*, badająca kleje do płytek.

Celem artykułu jest zaprezentowanie wyników badań dwóch modeli grzejnika płaszczyznowego o różniących się typach izolacji termicznej. Sprawdzono ich przyczepność metodą pull-off przed eksploatacją pomieszczeń, po 3 dniach od ułożenia terakoty oraz w czasie eksploatacji – badanie po 28 dniach, gdy zaprawa klejowa osiąga pełną, dedykowaną przez producenta wytrzymałość na rozciąganie przy zerwaniu i odkształcalność. Dodatkowo zbadano siły rozciągające prostopadłe do powierzchni czołowych po badaniach nasiąkliwości i mrozoodporności.

2. Opis stanowiska pomiarowego i metodyka badań

Badania zostały wykonane w przemysłowym laboratorium firmy Sika Poland w Warszawie. Zakres wykonanych badań obejmował pomiary przyczepności metodą pull-off grzejnika płaszczyznowego zbudowanego na bazie płyt SYNTHOS XPS 30, o powierzchni wytłaczanej, tak zwany „wafel” i EPS 200-036 „hydro” Dach-Podłoga-Parking, bez zastosowania rozpraszaczy ciepła w postaci folii lub blach z metali. Użyto klejów cementowych typu C2TE S1. Schemat stanowiska pomiarowego prezentuje rysunek 1.

Schemat stanowiska badawczego i oprzyrządowania do badania mrozoodporności prezentuje rysunek 2. Badania przyczepności zostały wykonane na konstrukcji podłóg przedstawionych na rysunku 3.

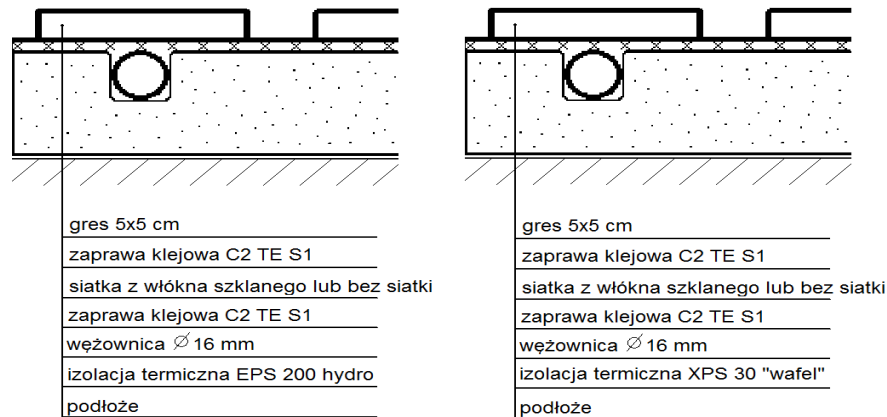
Badania nasiąkliwości wykonano na płytach z siatką po 21 dniach całkowitego zanurzenia w wodzie w temperaturze 20°C, zgodnie z normą PN-EN 1348: 2008. Próbkki te poddano badaniu na rozciąganie prostopadłe do powierzchni czołowych zgodnie z procedurą 8.3 tej normy. Kolejne próbki opisane na rysunku 2 (wyłącznie z siatką) poddano badaniu mrozoodporności po 25 cyklach zamrażania i rozmrażania w wodzie zgodnie z normą PN-B 06250:1988. Zastosowano procedurę 6.5.1.3 normy dotyczącej badań betonów zwykłych, stosując zamrażanie w temperaturze $-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ na minimum 4 godziny i odmrażanie w wodzie w temperaturze $+18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ w czasie 2-4 godzin. Wykonano również eksperymenty nienormowe z 50 krotnym cyklem zamrażania i odmrażania, czyli 2 razy dłuższym niż podaje norma badania klejów do płytek.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe do badania przyczepności o zakresie pomiaru 1,6-16 kN (fot. J. Karpiesiuk)



Rys. 2. Komora do badań mrozoodporności (fot. J. Karpiesiuk)



Rys. 3. Stanowiska do badania przyczepności konstrukcji podłogi z płytą izolacyjną metodą pull-off (opracował J. Karpiesiuk)

3. Wyniki pomiarów

Wyniki wykonanych badań przyczepności metodą pull-off czterech różnych układów płyt grzewczych przedstawia tabela 1.

Rezultaty badań wytrzymałości na rozciąganie układów A i B bez odcinania siatki, badanych prostopadle do powierzchni czołowych po długotrwałej nasiąkliwości i całkowitym zanurzeniu w wodzie przez 21 dni, podano w tabeli 2.

Wyniki badań nad wytrzymałością na rozciąganie prostopadle do powierzchni czołowych po zamrażaniu i odmrażaniu układów A i B podano w tabeli 3.

Sposób i miejsca odspojenia pokazano na rysunku 4.

4. Analiza wyników

W artykule zaprezentowano wyniki badań wytrzymałości, nietypowego grzejnika powierzchniowego, w którym wyeliminowano warstwę konstrukcyjną podłogi w postaci tak zwanych jastrychów. Zastosowano ten sam układ warstw podłogi jak w badaniach gęstości strumienia ciepła i bezwładności cieplnej (Karpiesiuk, 2015). Model badawczy rozszerzono poprzez zastosowanie tańszej płyty izolacyjnej EPS i brak siatki z włókien szklanych. W prezentowanym modelu zastosowano następujący

schemat warstw konstrukcyjnych od dołu podłogi lub od wnętrza ściany:

- płyta izolacyjna XPS „wafel” lub EPS,
- wężownica PCV wbudowana w rowki,
- klej typu C2TE S1 z siatką z włókna szklanego lub bez siatki,
- posadzka z gresu zamocowana klejem cementowym klasy C2TE S1.

Zastosowanie wariantów z tańszym materiałem izolacyjnym EPS i droższym XPS, jak też z siatką i bez jej użycia było celowe. Celem było sprawdzenie możliwości wykorzystania różnych rozwiązań materiałowych do zastosowanych konstrukcji podłogi oraz ocena zasadności ich stosowania, a także porównanie różnic przyczepności metodą pull-off po badaniu nasiąkliwości i mrozoodporności. Wielowariantowość badań umożliwiła porównanie użytych materiałów. Badania przyczepności wykonane po 3 dniach od ułożenia gresu na kleju cementowym, czyli w trakcie wykonywania prac posadzkarskich, jak też w warunkach eksploatacji podłogi grzewczej, po osiągnięciu całkowitej ich wytrzymałości, czyli po 28-31 dniach, pozwoliły porównać siły przyczepności dla tych warunków, jak też względem wykazanych w normach przy systemach ETICS i w stosunku do betonów. Dodatkowo porównano siły przyczepności klejów bez siatki i z siatką z włókna szklanego.

Tab. 1. Siły przyczepności z opisem miejsca odspojenia

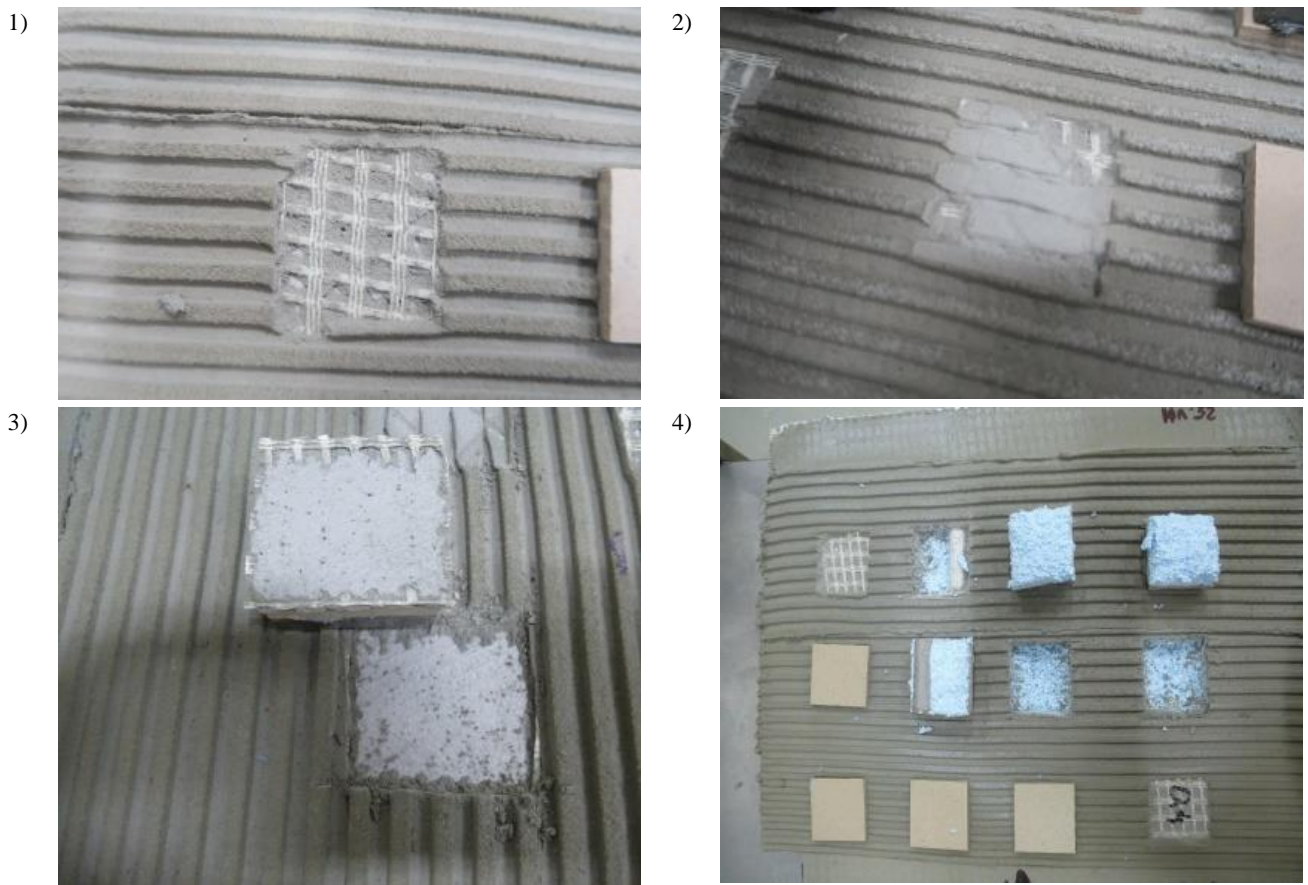
PRÓBK NR	UKŁAD „A”	Liczba dni	F [kN]	F _p [MPa]	Opis zniszczenia
1	XPS SYNTHOS	3	0,34	0,136	
2	30,”wafel”/ SikaCeram 255	3	0,49	0,196	kohezyjne odspojenie w kleju na połączeniu z siatką
3	z siatką/ gres	3	0,49	0,196	
1	XPS SYNTHOS	28	0,77	0,308	
2	30,”wafel”/ SikaCeram 255	28	0,72	0,288	
3	z siatką/ gres	28	0,62	0,248	adhezyjne odspojenie kleju od gresu
1	XPS SYNTHOS	29	0,85	0,340	kohezyjne odspojenie w kleju na połączeniu z siatką
2	30,”wafel”/ SikaCeram 255	29	0,77	0,308	
3	z siatką/ gres	29	0,80	0,320	
UKŁAD „B”					
1	EPS 200 hydro/	3	0,36	0,144	kohezyjne odspojenie w kleju na połączeniu z siatką
2	SikaCeram 255	3	0,34	0,136	
3	z siatką/ gres	3	0,28	0,112	
1		28	0,49	0,196	kohezyjne odspojenie w kleju na połączeniu z siatką
2	EPS 200 hydro/	28	0,59	0,236	
3	SikaCeram 255	28	0,49	0,196	
1	z siatką/ gres	29	0,44	0,176	
UKŁAD „C”					
1	XPS SYNTHOS	31	0,46	0,184	kohezyjne odspojenie w XPS-ie
2	30,”wafel”/ SikaCeram 255,	31	0,54	0,216	
3	siatka punktowo odcięta/ gres	31	0,46	0,184	
UKŁAD „D”					
1	EPS 200 hydro/	31	0,24	0,096	Kohezyjne odspojenie w EPS-ie
2	SikaCeram 255,	31	0,34	0,136	
3	siatka punktowo odcięta / gres	31	031	0,124	

Tab. 2. Siły rozciągające przy zerwaniu w badaniu długotrwałej nasiąkliwości (po 21 dniach) z opisem miejsca odspojenia

PRÓBK NR	UKŁAD	F [kN]	F _p [MPa]	Opis zniszczenia
UKŁAD „B”				
1		0,44	0,176	
2	XPS SYNTHOS	0,42	0,168	kohezyjne odspojenie w kleju na połączeniu z siatką
	30,”wafel”/ SikaCeram 255			
3	z siatką/ gres	0,49	0,196	
UKŁAD „A”				
1		0,50	0,200	
2	EPS 200 hydro/	0,46	0,184	kohezyjne odspojenie w kleju na połączeniu z siatką
	SikaCeram 255			
3	z siatką/ gres	0,42	0,168	

Tab. 3. Siły rozciągające prostopadłe do powierzchni czołowych przy 25 i 50 cyklach zamrażania i rozmrażania

PRÓBK NR	UKŁAD	F[kN] po 25 cyklach	F _p [MPa]	F [kN] po 50 cyklach	F _p [MPa]	Opis zniszczenia
UKŁAD „A”						
1	XPS	0,40	0,160	0	0	adhezyjne odspojenie kleju od gresu
2	SYNTHOS 30, „wafel”/	0,39	0,156	0,12	0,048	
3	SikaCeram 255 z siatką/	-	-	0,13	0,052	
4	gres	-	-	0	0	
UKŁAD „B”						
1	EPS 200	0,43	0,172	0,12	0,048	adhezyjne odspojenie kleju od gresu
2	hydro/ SikaCeram	0,46	0,184	0,20	0,080	
3	255 z siatką/	-	-	0,12	0,048	
4	gres	-	-	0	0	

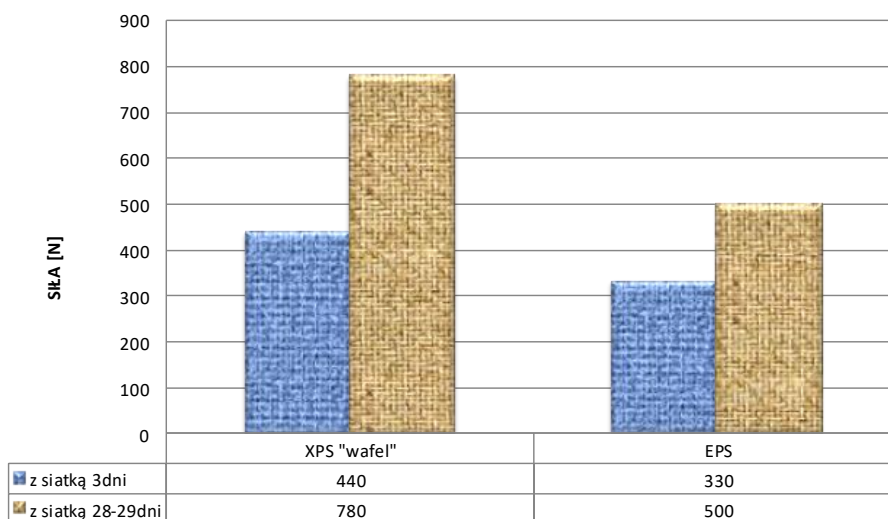


Rys. 4. Opis odspojień przy badaniu przyczepności: 1) kohezyjne odspojenie w kleju na połączeniu z siatką, 2) adhezyjne odspojenie kleju od gresu, 3) kohezyjne odspojenie w XPS-ie, 4) Kohezyjne odspojenie w EPS-ie

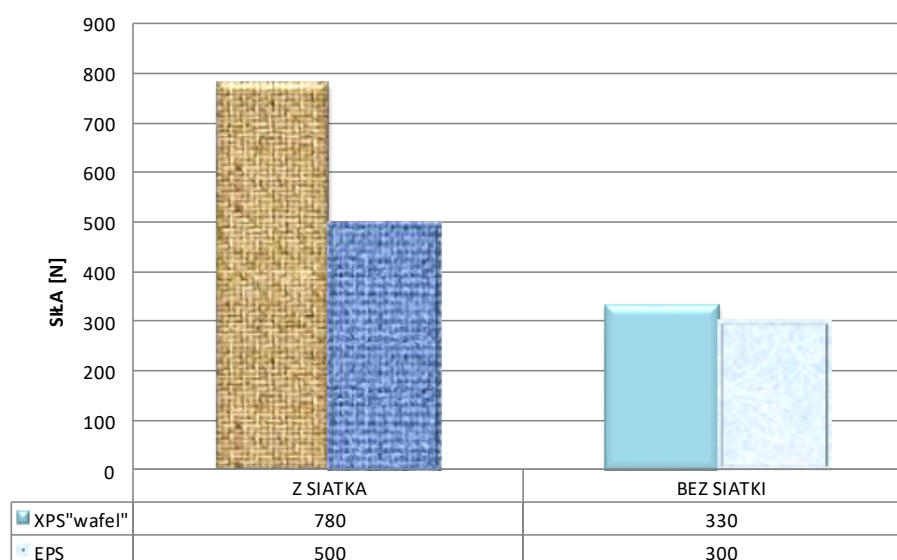
Na podstawie wyników badań stwierdzono, że dla wariantu z siatką z włókna szklanego, po 3 dniach od nałożenia kleju, obciążenie rozciągające przy zerwaniu wynosi około 60% zbadanej, całkowitej siły przyczepności dla płyt izolacyjnych XPS „wafel”, a około 70% dla płyt EPS. Odpowiednio siły te wynoszą 440 N (0,176 MPa) i 330 N (0,130 MPa). O około 35% lepszą przyczepność wykazują płyty XPS „wafel” o średniej sile odspojenia po 28-29 dniach wynoszącej 780 N (0,3 MPa) względem EPS – średnio 500 N

(0,21 MPa). Pokazują to rysunki 5 i 6.

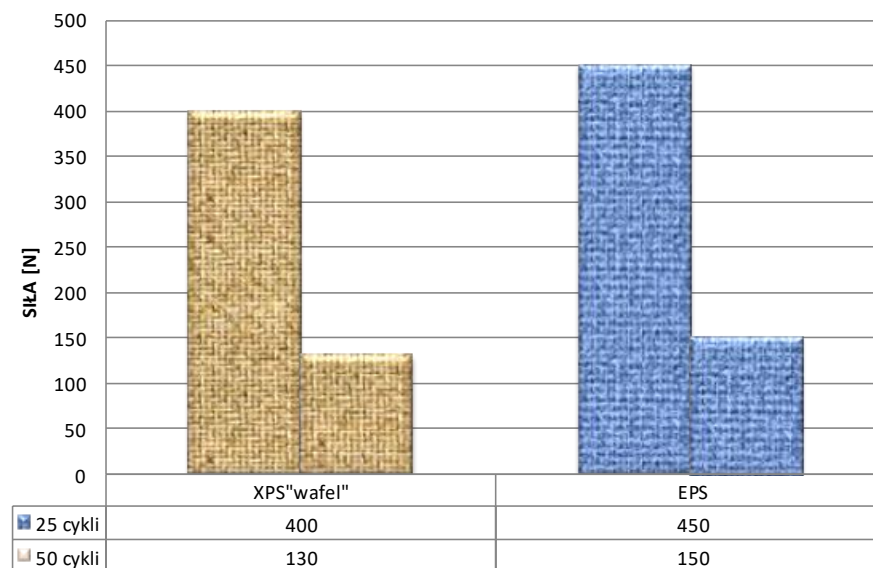
Stosując pokrycie płyty grzejnej bez siatki z włókna szklanego przyczepność gresu w płycie XPS jest o 10% większa niż w EPS, przy sile odpowiednio 330 N (0,132 MPa) i 300 N (0,12 MPa), co przedstawia rysunek 6. Siła rozciągająca określana po badaniu nasiąkliwości układów warstw z XPS-em i EPS-em wynosi w obu przypadkach średnio 450 N (0,18 MPa). Porównując ten wynik do rezultatów badań w warunkach suchych odnotowano niewielki średnio około 10% spadek siły



Rys. 5. Uśrednione wyniki badań przyczepności metodą pull-off płyty izolacyjnej XPS i EPS po 3 i 28-29 dniach.



Rys. 6. Uśrednione wyniki badań przyczepności metodą pull-off płyty izolacyjnej XPS i EPS po 28-31 dniach, z wtopioną w klej siatką lub bez niej.



Rys. 7. Uśrednione wyniki rozciągania po zamrażaniu i rozmrażaniu płyty izolacyjnej XPS i EPS z wtopioną w klej siatką

przyczepności po całkowitym 21 dniowym zanurzeniu w wodzie dla konstrukcji podłogi z użyciem siatki i EPS-u oraz większy – 28% spadek w tego typu podłodze z XPS-em.

Średnia siła rozciągająca prostopadła do powierzchni czołowych po 25 cyklach zamrażania i rozmrażania płyty EPS wynosi średnio 450 N (0,18 MPa), czyli jest zbliżona do wyników badań samej nasiąkliwości. W płycie XPS ta wytrzymałość nieznacznie spada do około 0,16 MPa, czyli o 10%. Przy 50 cyklach zamrażania i rozmrażania wytrzymałość na rozciąganie spada w tym przypadku do poziomu średnio 0,05 MPa (130 N) dla XPS-u i 0,06 MPa dla EPS-u (150 N), co przedstawiono na rysunku 7.

5. Wnioski

Znaczne różnice wyników badań przyczepności układów warstwowych grzejnika płaszczyznowego z siatką włókna szklanego i bez niej pozwalają na stwierdzenie, że konstrukcja podłogi z siatką jest stabilniejsza. Użycie tego rodzaju wzmocnienia zaprawy klejowej nie wpływa znacząco na koszty wykonania systemu grzejnego. Należy przy tym pamiętać o możliwym tak zwanym klawiszowaniu płyt, mogącym występować w przypadku nierówności podłoża. Powyższe wyniki zarówno po 3, jak i po 28 dniach potwierdzają dodatkowo spełnienie Zaleceń Udzielania Aprobata Technicznych ITB ZUAT-15/V.03/2010 (2010), dotyczących zestawów do wykonywania ociepleń zewnętrznych ścian z zastosowaniem płyt EPS w systemie ETICS oraz z Europejską oceną techniczną (ETA) dla płyt XPS na podstawie ETAG 004:2013, gdzie minimalna wartość przyczepności kleju do styropianu wynosi 0,08 MPa. Układ płyty izolacyjnej XPS "wafel" z siatką o średniej przyczepności 0,30 MPa spełnia nawet wymagania ITB (2010), klejów do betonu o znacznie lepszej przyczepności, która wynosi minimum 0,25 MPa.

Konstrukcja podłogi ze styropianem (EPS) ma wyższą odporność na siły rozciągające pod wpływem długotrwałego działania wody, co jest spowodowane, wyższą jego wodochłonnością od XPS-u. Powyższe wnioski potwierdzają badania mrozoodporności przy 25 cyklach zamrażania i rozmrażania. Dodatkowe nienormowe badania przy 50 cyklach pokazują, że zastosowany klej cementowy układany na warstwie izolacji termicznej, poddany długotrwałemu działaniu wody i mrozu traci właściwości adhezyjne, a więc nie powinien być stosowany w systemach ochrony przed śniegiem i lodem.

Przeprowadzone badania wytrzymałościowe grzejnika płaszczyznowego o lekkiej konstrukcji bez jastrychów

można uznać za wstępne. Żukowski i Karpiesiuk (2015b) wskazują, że tego typu grzejnik nie jest idealnym rozwiązaniem. Jego niedoskonałość upatruje się w braku warstwy rozpraszającej ciepło (lameli), co przy większych rozstawach węzownicy może pogorszyć termiczny komfort tego modelu grzejnego. W związku z tym, należy przeprowadzić tego typu badania wytrzymałościowe na grzejniku płaszczyznowym z elementami rozpraszającymi ciepło.

Literatura

- Karpiesiuk P. (2015). Badania pola temperatury przy ogrzewaniu płaszczyznowym. Praca dyplomowa inżynierska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, *Politechnika Białostocka*.
- Żukowski M., Karpiesiuk P. (2015a). Wyniki badań grzejnika płaszczyznowego typu B wykonanego w technologii suchej. *Instal*, 7/8, 33-37.
- Żukowski M., Karpiesiuk P. (2015b). Wyniki badań grzejnika płaszczyznowego o bardzo małej wysokości. *Instal*, 10, 38-41.
- ITB (2010). ZUAT-15/V.03/2010 Zestawy wyrobów do wykonywania ociepleń ścian zewnętrznych z zastosowaniem styropianu jako materiału termoizolacyjnego i pocienionej wyprawy elewacyjnej (ETICS). Wydanie III. *ITB*, Warszawa.
- ETAG 004:2013 Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering.
- ETA 07/0316 ATLAS XPS Złożony system izolacji cieplnej z wyprawami tynkarskimi.

THE RESULTS OF SELECTED STRENGTH TESTS OF THE ADHESIVE LAYER OF RADIANT HEATER WITH LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION

Abstract: The paper presents the results of strength tests for lightweight radiant heater made in so called dry technology. One of its features is a very low thickness due to wet or dry screeds replaced by the fiberglass mesh structure with the adhesive cement. The research of pull-off, water absorption and frost resistance of the radiant heaters without the heat dissipating elements (heat diffusers) were carried out for the selected adhesives. The results confirm the complying with the conditions of applying insulation boards EPS and XPS in the adopted design of this radiant heater by using a fiberglass mesh, except applying it for protection against snow and ice.

Autorzy dziękują Panom z firmy Sika Poland Wojciechowi Ziemińskiemu i Kamilowi Psyk za przygotowanie próbek i udostępnienie przemysłowego laboratorium w Warszawie.

ANALIZA UGIĘĆ I ZARYSOWANIA BETONOWYCH BELEK ZE ZBROJENIEM NIEMETALICZNYM

Marta KOSIOR-KAZBERUK*, Rafał WASILCZYK

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

Streszczenie: W pracy analizowano zachowanie się modelowych belek z betonu, zbrojonych prętami bazaltowymi (BFRP), w warunkach trójpunktowego zginania. Badano parametry wytrzymałościowe prętów BFRP. Określono nośność belek na zginanie, odkształcenia betonu i ugięcie. Otrzymane wyniki porównano z wynikami obliczeń ugięcia na podstawie standardu ACI 440:1R-06. Zarysowanie belek pod wpływem obciążenia analizowano przy wykorzystaniu optycznego systemu pomiarowego Aramis 5M. Ze względu na charakterystykę wytrzymałościową prętów kompozytowych, belki zbrojone nimi wykazywały znaczące odkształcenia wywołane rozciąganiem, co skutkowało rozwojem rys o znacznej szerokości. Obserwowano liniową zależność ugięcia belki modelowej od obciążenia. Stwierdzono, że procedura obliczeniowa ACI 440:1R-06 pozwala na dokładne określenie ugięć belek zbrojonych prętami bazaltowymi przy obciążeniach krótkotrwałych.

Słowa kluczowe: pręty BFRP, belka zbrojona, ugięcie, zarysowanie.

1. Wprowadzenie

Pręty zbrojeniowe FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) wytwarzane są metodą pultruzji z ciągłych włókien węglowych, bazaltowych lub szklanych oraz żywicy epoksydowych lub poliestrowych. Technologia ta opiera się na przeciągnięciu materiału przez zestaw dysz kształtujących pasma włókien, które później zostają zanurzone w żywicy i formowane jako pręty gładkie. Następnie pręty są owijane tzw. rovingiem (ciągłymi włóknami ułożonymi jednokierunkowo), pełniącym rolę uźebrowania, analogicznie jak w przypadku konwencjonalnych, stalowych prętów zbrojeniowych (ACI 440.1R, 2006).

Pręty kompozytowe stały się użytecznym zamiennikiem konwencjonalnego zbrojenia tam, gdzie decydującą rolę w konstrukcjach inżynierii lądowej odgrywa nośność i odporność na czynniki środowiskowe (Fiore i in., 2011; Inmana i in., 2017; Urbański i in., 2013). Uwzględniając wymagania odpowiedzialnego projektowania obiektów inżynierskich ze szczególnym naciskiem na trwałość, wykorzystanie zbrojenia niemetalicznego w konstrukcyjnych elementach zbrojonych pozwala na redukcję kosztów związanych ze wznoszeniem budowli, a także kosztów utrzymania obiektów i ewentualnych remontów. Pręty niemetaliczne charakteryzują się wysoką odpornością na korozję, co pozwala wydłużyć cykl życia obiektu (Artemenko, 2003; Bank, 2006; Wei i in., 2010). Wykorzystywane są często do realizacji betonowych elementów

konstrukcyjnych narażonych na silną agresję środowiska, takich jak fundamenty, falochrony i inne konstrukcje nadmorskie oraz zbiorniki w oczyszczalniach ścieków (Fiore i in., 2011; Wei i in., 2010).

Zastosowanie prętów FRP pozwala zredukować grubość otuliny wokół zbrojenia, co umożliwia również zmniejszenie wymiarów i ciężaru własnego elementu konstrukcyjnego. Większa wytrzymałość na rozciąganie prętów kompozytowych, w porównaniu do typowych prętów stalowych, umożliwia zmniejszenie ich średnicy, a mniejszy ciężar objętościowy materiału kompozytowego również wpływa na zmniejszenie całkowitego ciężaru konstrukcji (Branston i in., 2016; Elgabbas i in., 2015; Selejda i Brózda, 2016).

Pomimo upowszechnienia różnych rodzajów prętów niemetalicznych oraz prowadzonych licznych badań elementów konstrukcyjnych zbrojonych tymi prętami (Banibayat i Patnaik, 2014; Urbański, 2017), nadal ten rodzaj zbrojenia traktowany jest jako niekonwencjonalny materiał konstrukcyjny. Jedną z przyczyn jest brak krajowych norm oraz jasnych wytycznych projektowania konstrukcji zbrojonych prętami FRP. Dotychczas nie opracowano również norm dotyczących określania parametrów mechanicznych prętów zbrojeniowych typu FRP, co sprawia, że przy każdym wykorzystaniu tego rodzaju zbrojenia należy przeprowadzić odrębne badania właściwości mechanicznych.

Stosunkowo najmniej badań konstrukcji ze zbrojeniem niemetalicznym, prezentowanych w literaturze, dotyczy wykorzystania prętów bazaltowych (BFRP). Pręty BFRP

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

są nowym materiałem, którego właściwości nie zostały jeszcze w pełni zbadane. Wchodzące w ich skład włókna bazaltowe charakteryzują się wysoką stabilnością chemiczną i termiczną (Kabay, 2014). Włókno bazaltowe zachowuje strukturę bazaltu i takie cechy, jak odporność korozyjna, idealna izolacyjność cieplna, pochłanianie dźwięku i niska absorpcja wilgoci. Ponadto, włókno wykazuje większą wytrzymałość na rozciąganie niż stal i stosunkowo wysoki moduł sprężystości podłużnej, jednakże mniejszy niż moduł sprężystości stali. Według Sima i in. (2005) włókna bazaltowe wykazują większą wytrzymałość na rozciąganie niż włókna szklane typu E, większe odkształcenia graniczne przy zniszczeniu niż włókna węglowe, jak również dobrą odporność w warunkach agresywności chemicznej i temperatur pożarowych (High i in., 2015; Borhan, 2012). Pręty bazaltowe dzięki korzystnym właściwościom użytkowym włókien bazaltowych, mogą stanowić alternatywę dla zbrojenia konwencjonalnego, zatem należy podejmować prace badawcze służące upowszechnieniu ich stosowania.

Celem badań przedstawionych w pracy jest ocena zachowania się poddanych zginaniu modelowych belek z betonu, zbrojonych prętami bazaltowymi (BFRP). Ustalono parametry mechaniczne prętów kompozytowych wykonanych przy zastosowaniu włókien bazaltowych. Określono nośność, wartości ugięć i zarysowanie badanych elementów w warunkach trójpunktowego zginania.

2. Materiały i metody badań

2.1. Materiały

Do wykonania belkowych elementów modelowych wykorzystano beton o stosunku $w/c = 0,50$ i zawartości cementu CEM I 42,5R równej 320 kg/m^3 . Jako kruszywo zastosowano mieszaninę piasku i żwiru o uziarnieniu do 16 mm. Beton projektowano uwzględniając wymagania dla elementów konstrukcyjnych przeznaczonych do użytkowania w klasie ekspozycji

XC3 (m. in. cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w wilgotnym środowisku) według PN-EN 206-1 (2017). Recepturę betonu przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Skład mieszanki betonowej

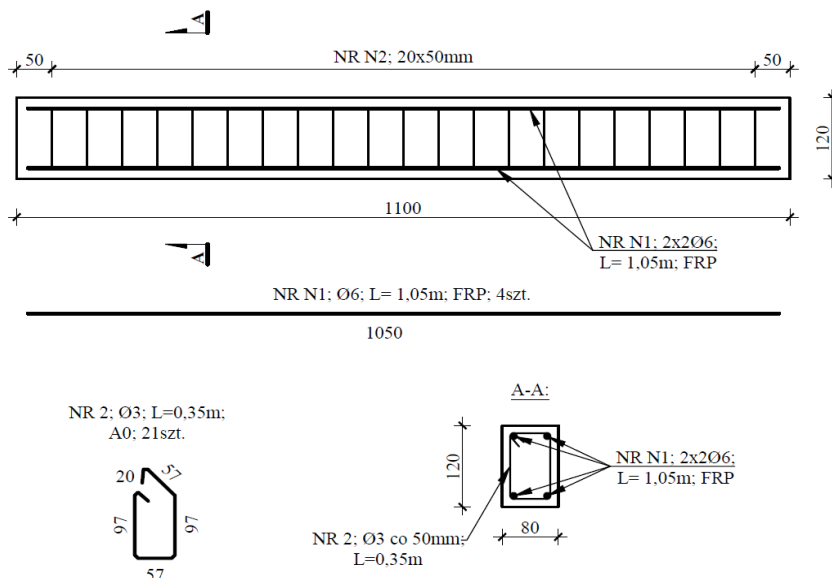
Lp.	Składnik	Gęstość [kg/m ³]	Ilość na 1 m ³ betonu [kg]
1	Cement CEM I 42,5R	3,10	320
2	Woda	1,00	160
3	Piasek o uziarnieniu 0-2 mm	2,65	732
4	Żwir o uziarnieniu 2-16 mm	2,65	1203
5	Plastyfikator Chryso Spolox TR	1,07	5,49

Zastosowany beton charakteryzował się średnią wytrzymałością na ściskanie i modułem sprężystości, odpowiednio 51,1 MPa i 38,6 GPa.

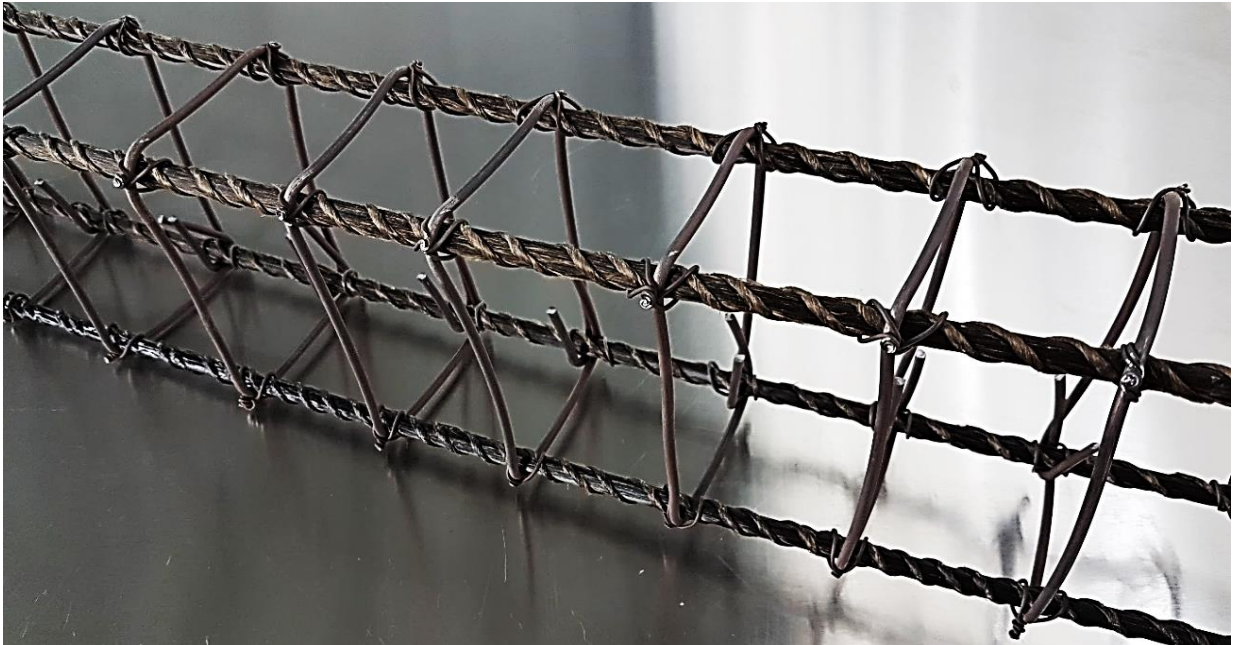
Zbrojenie badanych belek stanowiły niemetaliczne pręty składające się z włókien bazaltowych (BFRP) o matrycy z żywicy poliestrowej.

2.2. Sposób przygotowania elementów próbnych

Przedmiotem badań były belki modelowe o wymiarach $80 \times 120 \times 1100$ mm. Układ zbrojenia elementów badawczych bazował na 4 prętach głównych FRP o średnicy $\phi 6$ mm w każdym z naroży przekroju poprzecznego oraz równomiernie rozmieszczonych strzemionach o średnicy $\phi 3$ mm ze stali A-0. Elementy modelowe zostały zaprojektowane zgodnie z wytycznymi ACI 440:1R-06 (2006), przy założeniu zmiażdżenia strefy ściskanej betonu jako mechanizmu ich zniszczenia. Schemat zbrojenia belek oraz widok wykonanego zbrojenia przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Zbrojenie belek modelowych



Rys. 2. Ramka zbrojeniowa z prętami BFRP

2.3. Badanie parametrów wytrzymałościowych prętów BFRP

W ramach wykonanych badań określono podstawowe, wymagane przez ACI 440:1R-06 (2006) i ACI 440:3R (2004), parametry wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych, to jest:

- f_{fu}^* – gwarantowaną wytrzymałość na rozciąganie, zdefiniowaną jako średnia wytrzymałość na rozciąganie $f_{u,ave}$ pomniejszona o potrójną wartość odchylenia standardowego σ ,
- E_f – gwarantowany moduł sprężystości równy średniej wartości modułu sprężystości uzyskanego z badań E_{ave} ,
- e_{fu}^* – gwarantowane odkształcenie przy zerwaniu, obliczane analogicznie jak f_{fu}^* na podstawie wartości średniej $\varepsilon_{u,ave}$ pomniejszonej o potrójną wartość odchylenia standardowego σ .

Badanie parametrów wytrzymałościowych prętów kompozytowych wymaga specjalnego przygotowania próbek polegającego na wykonaniu systemu mocującego końce bazaltowego pręta rozciąganego w uchwytach maszyny wytrzymałościowej. W tym celu, wzorując się na zaleceniach ACI 440:3R-04 (2004) oraz ASTM D7205M (2016), wykonano mocowania prętów niemetalicznych o średnicy $\phi 6$ mm w stalowych tulejach o grubości ścianek 5 mm, wypełniając wolne przestrzenie szybkowiążącą mieszką ekspansywną o wytrzymałości na ściskanie równej 60 MPa po 24 godzinach i 110 MPa po 28 dniach dojrzewania. Po 4 tygodniach od wykonania mocowań przystąpiono do testów z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick o maksymalnym obciążeniu 250 kN. Pomiaru odkształceń wykonywano za pomocą ekstensometru o dokładności 0,001 mm. Badania prowadzono przy stałej prędkości narastania obciążenia równej 0,1 kN/s.

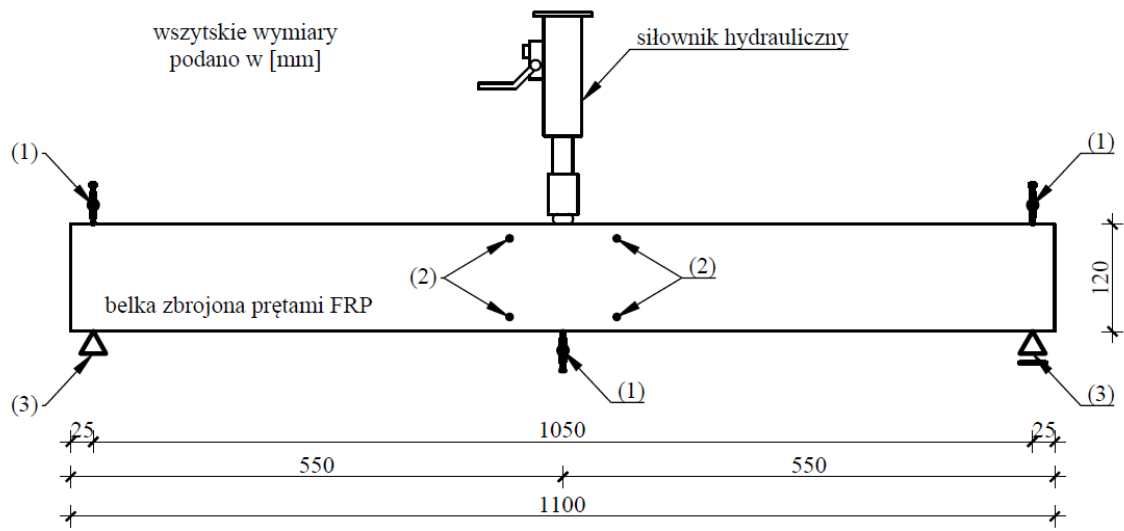
2.4. Metodyka badania belek modelowych

Belki badano w układzie trójpunktowego zginania (rys. 3). Odległość pomiędzy podporami badanych belek wynosiła 1050 mm, a obciążenie przyłożono w środku rozpiętości próbek. Wielkościami mierzonymi były przemieszczenia belek na podporach i w przęśle oraz odkształcenia w różnych punktach wysokości przekroju w środku rozpiętości przęśla. Zamocowano 4 linie reperów pomiarowych, pokazane na rysunku 4. Linie 1 i 4 odpowiadają położeniu zbrojenia ściskanego i rozciąganego, natomiast linie 2 i 3 znajdują się w odległości 30 mm w stosunku do linii skrajnych.

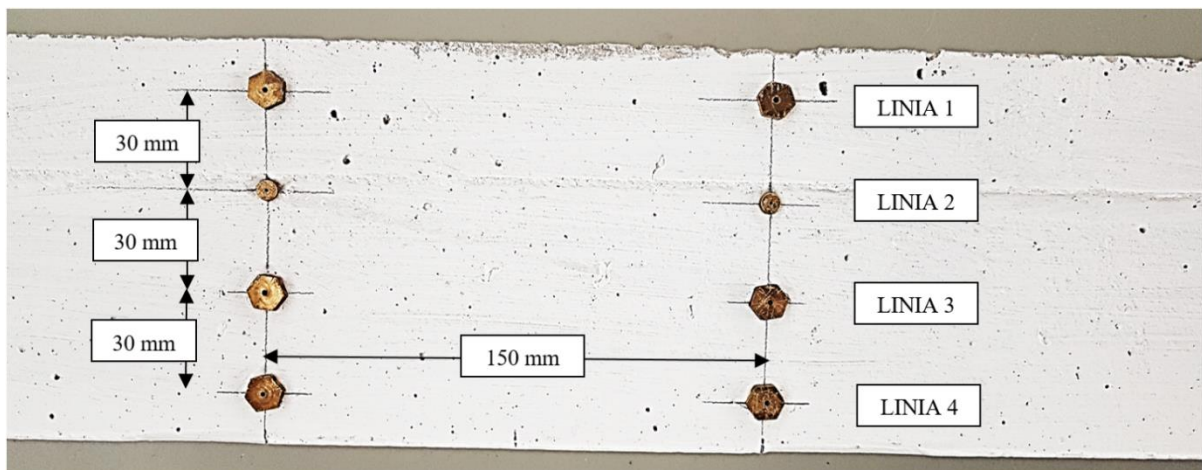
Widok kompletnego stanowiska badawczego pokazano na rysunku 5.

Wartości obciążenia niszczonego, ugięć i odkształceń dla poszczególnych poziomów obciążeń wyznaczono na podstawie badań pod obciążeniem doraźnym. Obciążenie zadawano stopniowo, krokami co 2,0 kN, mierząc na każdym etapie wartości ugięć i odkształceń.

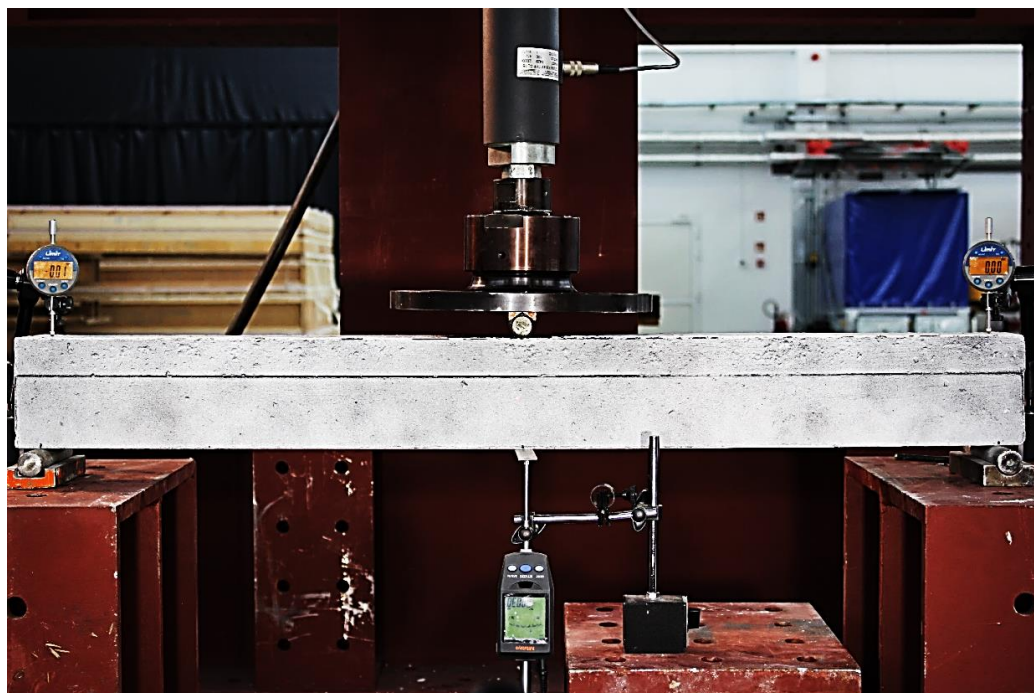
Rozwój zarysowania belek analizowano przy wykorzystaniu optycznego systemu akwizycji danych GOM Aramis. Zestaw pomiarowy składał się z dwóch współpracujących kamer oraz jednostki sterującej, umożliwiającej rejestrację do 5 milionów odczytów z częstotliwością 15 Hz. Procedura pomiarowa polegała na wstępnej kalibracji kamer dla danego obszaru roboczego, naniesieniu deseni w postaci czarnych kropek za pomocą dedykowanego preparatu oraz docelowo rejestracji przemieszczeń punktów pomiarowych w czasie, tak zwanych fasetek.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników przemieszczeń (1), punktów pomiarowych do pomiaru odkształceń (2) oraz podpór (3)



Rys. 4. Położenie punktów pomiarowych w środkowej części belki

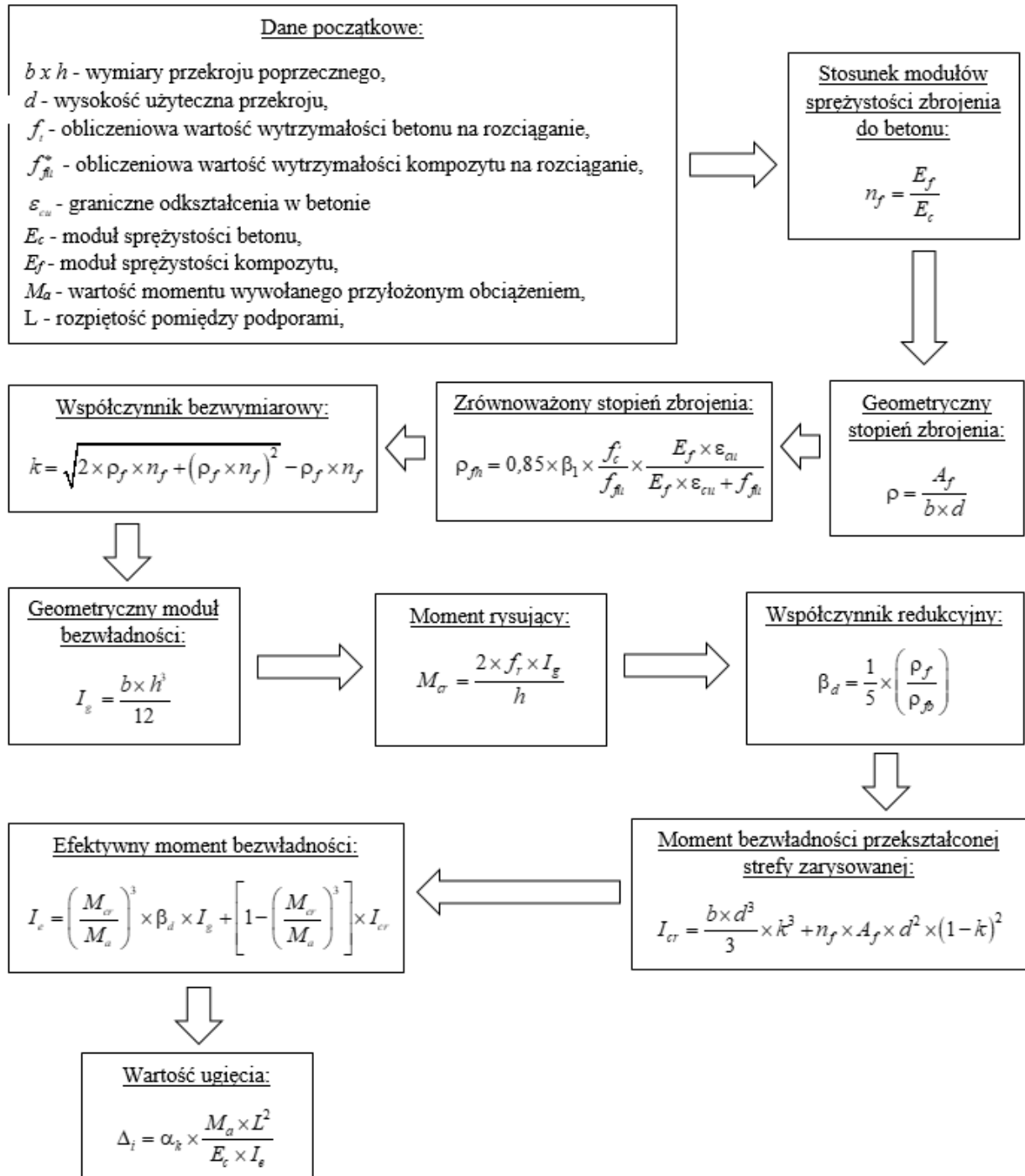


Rys. 5. Widok stanowiska badawczego

2.5. Procedura obliczania ugięcia belki ze zbrojeniem kompozytowym

Obliczenia przeprowadzono na podstawie wytycznych ACI 440:1R-06 (2006) dla belek ze zbrojeniem kompozytowym. Zastosowana norma dotyczy głównie elementów zbrojonych prętami z włókna węglowego, szklanego i aramidowego. Jak dotąd nie opracowano wytycznych dotyczących zbrojenia prętami z włókna bazaltowego. W celu uzyskania najbardziej zbliżonych wyników do wartości zmierzonych podczas testu przyjęto wartość współczynnika bezpieczeństwa równą 1,0. Na podstawie danych z pracy Urbańskiego (2017) zakłada

się, że jest to obecnie najbardziej dokładna metoda obliczeniowa, którą można odwzorować zachowanie się belek zbrojonych prętami BFRP. Założenia amerykańskiej procedury obliczeniowej przyjmują duże wartości materiałowych współczynników bezpieczeństwa wynikające między innymi z braku granicy plastyczności prętów FRP. W celu uzyskania teoretycznego wykresu ugięcia belki zbrojonej prętami BFRP obliczono wartości przewidywanych odkształceń dla każdego z zadanych kroków obciążeń podczas badań pod obciążeniem doraźnym. Procedurę obliczeń przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Algorytm obliczenia teoretycznego ugięcia elementu zbrojonego prętami kompozytowymi

3. Analiza wyników badań

3.1. Właściwości wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych BFRP

Otrzymane wyniki badania prętów zbrojeniowych przedstawiono w tabeli 2, a przykładowe zależności siła rozciągająca – wydłużenie pręta, uzyskane w trakcie badania, pokazano na rysunku 7.

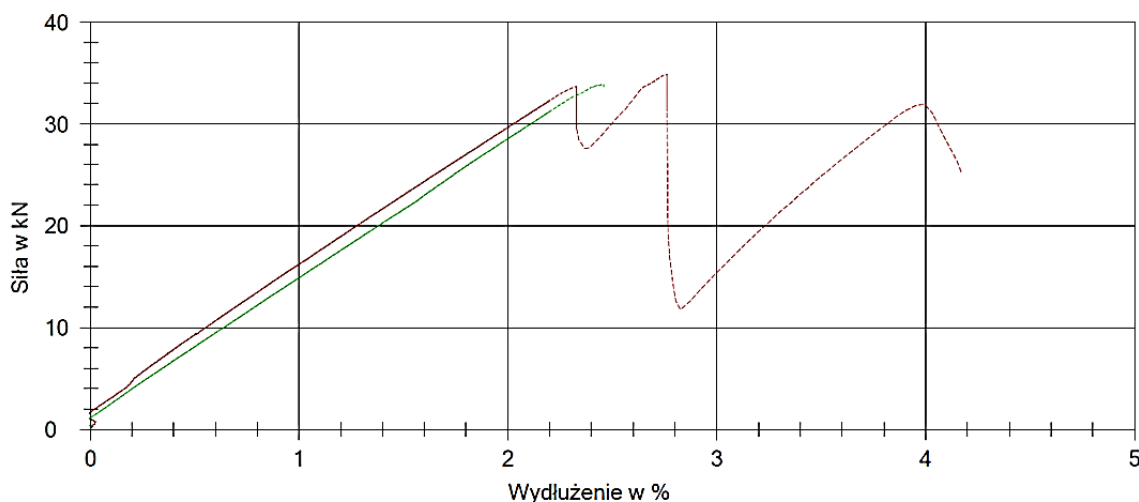
Na wykresie (rys. 7) widać jeden z charakterystycznych dla materiałów kompozytowych mechanizmów zniszczenia, gdy w centralnej części próbki zerwaniu ulegają stopniowo poszczególne partie włókien, włączając do pracy pozostałe mniej wyćężone włókna. Na rysunku 8

przedstawiono widok pręta BFRP po badaniu.

Badane pręty charakteryzowały się ponad dwukrotnie większą wytrzymałością na rozciąganie, a jednocześnie ponad trzykrotnie mniejszą wartością wydłużenia przy zerwaniu w porównaniu do typowych prętów zbrojeniowych ze stali gatunku B500SP o klasie ciągliwości C według danych katalogowych producenta (EPSTAL, 2018). Nie stwierdzono również występowania tak zwanej półki plastycznej. Mechanizm zniszczenia polegał na nagłym zerwaniu włókien bez widocznego przewężenia przekroju poprzecznego oraz bez nieproporcjonalnego wzrostu odkształceń w końcowej fazie testu. Możliwe było jedynie zarejestrowanie pojedynczych pęknięć tuż przed zniszczeniem próbki.

Tab. 2. Wyniki badań materiałowych prętów BFRP

Średnica [mm]	$f_{u,ave}$ [MPa]	σ (dla $f_{u,ave}$)	f^*_u [MPa]	E_f [GPa]	ε_u [%]	σ (dla f^*_u)	ε^*_{fu} [%]
ø6	1180,0	14,3	1147,1	47,6	2,6 %	0,2	2,0



Rys. 7. Wybrane wykresy zależności wydłużenia od wartości obciążenia prętów BFRP



Rys. 8. Widok zerwanego pręta BFRP o średnicy 6 mm

3.2. Analiza stanów odkształcenia belek ze zbrojeniem BFRP

Średnie wyniki pomiarów odkształceń betonu pod obciążeniem doraźnym na różnych wysokościach przekroju belki, w środku rozpiętości przedstawiono na rysunku 9.

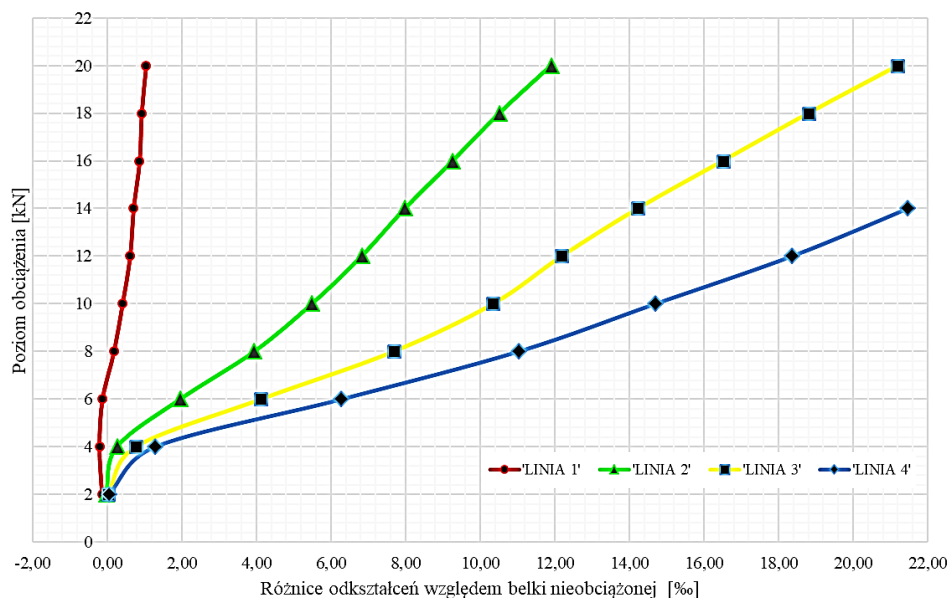
Zauważalny jest niewielki zakres strefy ściskanej w porównaniu do konwencjonalnych belek ze zbrojeniem stalowym, opisany między innymi, w pracach Godyckiego-Ćwirko (1982) i Szarlińskiego i in. (2002). Już przy obciążeniu na poziomie 8,0 kN, co odpowiada 28% wyężenia belki, zakres strefy ściskanej przesuwa się poza środek ciężkości zbrojenia górnego, wywołując tym samym naprężenia rozciągające w prętach zbrojeniowych. Przy zwiększaniu obciążenia, w odległości 0,125 d od górnej krawędzi belek ze zbrojeniem BFRP, pojawiają się wyłącznie odkształcenia wywołane rozciąganiem, osiągając wartości wielokrotnie przekraczające typowe odkształcenia rejestrowane w belkach żelbetowych (Szarliński i in., 2002; Urbański, 2017). Poza fazą początkową (do poziomu 15% wyężenia) przyrost odkształceń ma charakter liniowy w całym zakresie obciążenia. Proces ten postępował aż do zniszczenia elementu poprzez zmiżdżenie strefy ściskanej, zgodnie z założeniami projektowymi, przyjętymi przy wymiarowaniu belek.

Odmienny charakter odkształceń zarysowanych belek zbrojonych prętami BFRP, w porównaniu do belek żelbetowych wynika, między innymi, ze sposobu odkształcania się obu typów zbrojenia. Pręty stalowe odkształcają się sprężysto do osiągnięcia granicy sprężystości (Szarliński i in., 2002). Natomiast pręty BFRP odkształcają się sprężysto aż do ich zerwania. Analizując zwiększenie odkształceń strefy rozciąganej belek ze zbrojeniem kompozytowym należy również mieć na względzie znacznie mniejszą wartość modułu sprężystości prętów BFRP (dla badanych prętów

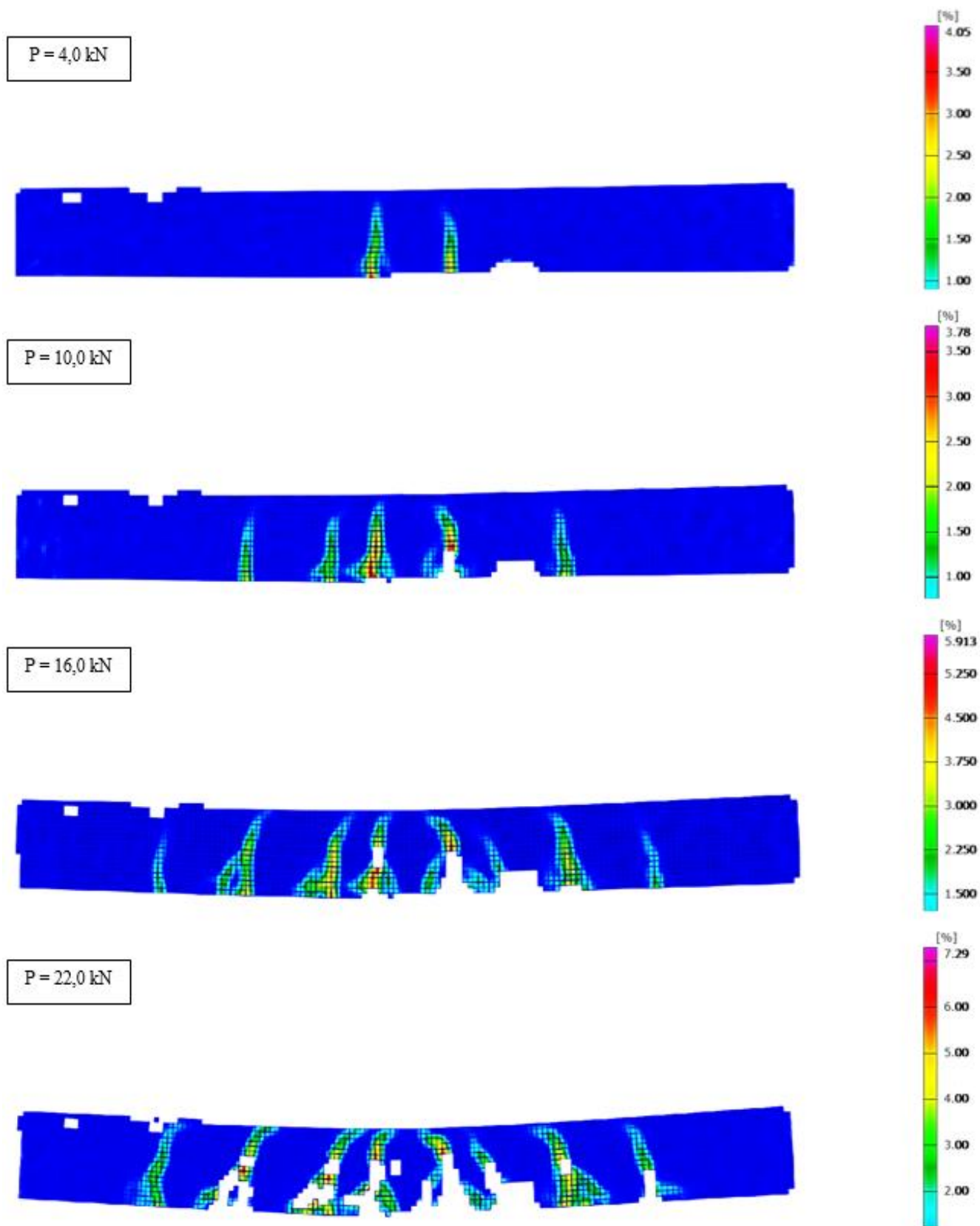
47,6 GPa) w porównaniu do modułu sprężystości typowej stali zbrojeniowej gatunku B500SP (200 GPa).

Na rysunku 10 przedstawiono rozwój zarysowania wraz z mapą odkształceń głównych modelowych belek ze zbrojeniem kompozytowym BFRP w warunkach trójpunktowego zginania. Widok obszaru krytycznego próbki tuż przed zniszczeniem zaprezentowano na rysunku 11. Widoczne na mapach odkształceń jaśniejsze obszary wskazują na głęboki zasięg występowania strefy rozciąganej w betonie, wywołany małą wartością stosunku modułu sprężystości zbrojenia kompozytowego do modułu sprężystości betonu, co w dalszej fazie testu determinowało również znaczny stopień zarysowania elementu. Obserwowany zasięg strefy ściskanej belek nie przekraczał wartości równej odległości osi zbrojenia górnego od krawędzi ściskanej przekroju.

Po przekroczeniu naprężenia rysującego w środkowej części belki powstają rysy prostopadłe do osi podłużnej. Przy dalszym wzroście obciążenia rysy prostopadłe znacząco powiększają się, a w strefie podporowej belki zaczynają pojawiać się rysy ukośne o kącie nachylenia większym od 45°. Zwiększając obciążenie w końcowej fazie badania, można zauważyć znaczny wzrost odkształceń na początku rysy (dolna krawędź belki), przy jednoczesnym równomiernym odkształceniu betonu w poziomie zbrojenia. W końcu następuje zniszczenie belki w wyniku propagacji dominującej rysy prostopadłej w środkowej części belki. W końcowej fazie obciążenia nie dochodzi do lokalnej utraty przyczepności pomiędzy zbrojeniem kompozytowym i otaczającym je betonem. Według Godyckiego-Ćwirko (1982) liczba rys, ich usytuowanie i nachylenie zależą od przyczepności zbrojenia głównego do betonu i naprężeń w prętach. Zatem, do wyjaśnienia rozwoju rys w belkach ze zbrojeniem BFRP niezbędna jest analiza przyczepności prętów do betonu.



Rys. 9. Wykres zmian odkształceń belek BFRP w przekroju przęsłowym (położenie linii pomiarowych pokazano na rys. 4)



Rys. 10. Mapa odkształceń głównych w belce przy różnych wartościach obciążenia P

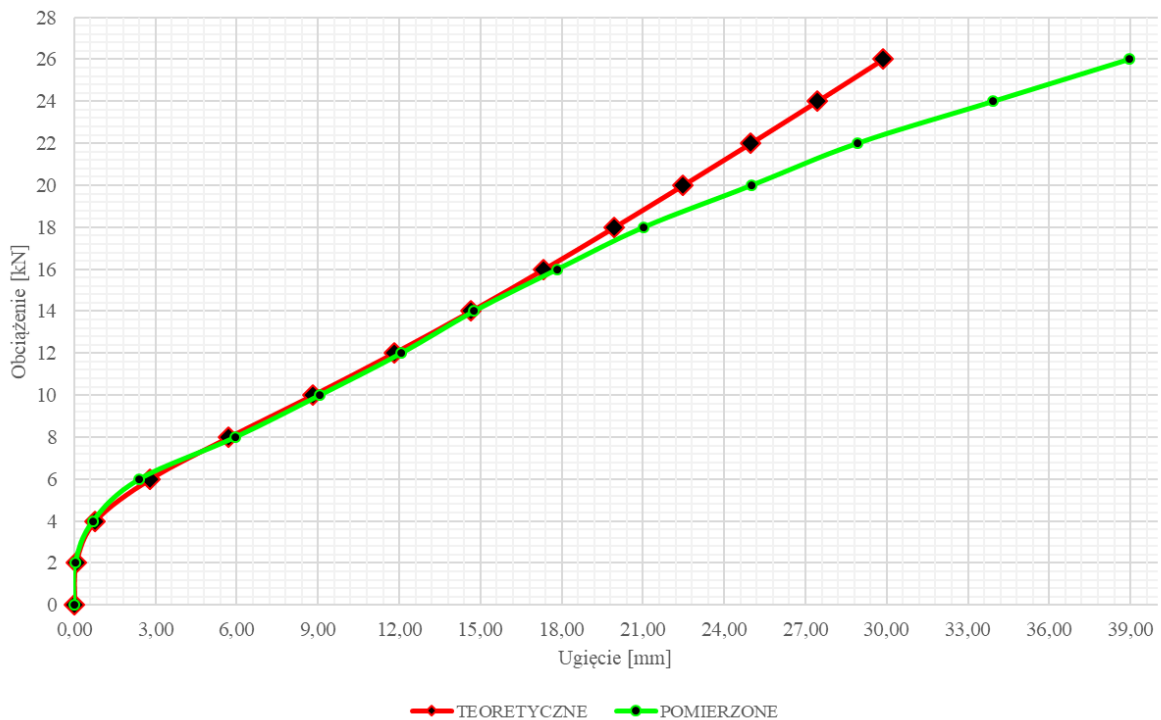


Rys. 11. Widok belki ze zbrojeniem BFRP przed zniszczeniem przy obciążeniu 26,0 kN

4. Porównanie ugięć otrzymanych doświadczalnie z wartościami obliczonymi

Jako podstawę do analizy teoretycznej otrzymanych wyników badań przyjęto wytyczne ACI 440:1R-06 (2006). Na rysunku 12 przedstawiono zestawienie wyników obliczeń ugięć oraz uśrednionych rezultatów pomiarów, umożliwiające ocenę ich zbieżności. Wyniki badań belek wskazują na przekroczenie stanu granicznego ugięcia (założonego jako $L/250$) już na poziomie 20% wyciężenia.

Na podstawie wyników badań stwierdzono zbieżność wartości obliczonych i pomierzonych do wartości obciążenia równej 22,0 kN, czyli około 78% wyciężenia belek. Średnie odchylenie w tym obszarze wynosiło 0,21 mm (2,22%). Ze względu na stosunkowo małą wartość modułu sprężystości zbrojenia BFRP, sztywność belki zmniejsza się znacznie po zarysowaniu. W związku z tym, efektywny moment bezwładności ma wartość nieznacznie większą od momentu bezwładności bezpośrednio po zarysowaniu, co przekłada się na znaczące wartości ugięć belki ze zbrojeniem kompozytowym.



Rys. 12. Wykres porównawczy wartości pomierzonych ugięć belek BRFP oraz obliczonych na podstawie algorytmu ACI (2006)

5. Podsumowanie

W pracy analizowano parametry wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych z włóknem bazaltowym (BFRP) oraz ich wpływ na ugięcie i zarysowanie modelowych belek zbrojonych.

Badania właściwości prętów kompozytowych wykazały, że zależność siła-wydłużenie w próbie rozciągania ma liniowy charakter w całym zakresie obciążenia. W próbie rozciągania prętów nie obserwuje się powstania półki plastycznej, a wartość maksymalnych odkształceń przed zerwaniem jest wielokrotnie większa niż w przypadku granicznych odkształceń typowej stali zbrojeniowej. Wytrzymałość prętów bazaltowych jest dwukrotnie większa od wytrzymałości stali, a moduł sprężystości podłużnej jest czterokrotnie mniejszy.

Charakterystyki wytrzymałościowe prętów kompozytowych mają istotny wpływ na zachowanie się belki zginanej. Obecność kompozytowych prętów zbrojeniowych powoduje zwiększenie wartości odkształceń w wyniku naprężeń rozciągających. Po przekroczeniu momentu rysującego w środkowej części belki powstają rysy prostopadłe o znacznej szerokości w poziomie zbrojenia rozciąganego. Ze względu na odporność na korozję prętów BFRP, szerokość rys nie ma takiego znaczenia, jak w konstrukcjach żelbetowych. W końcowej fazie obciążenia, w belkach ze zbrojeniem BFRP, nie dochodzi do lokalnej utraty przyczepności pomiędzy prętami a betonem. Do wyjaśnienia rozwoju rys w belkach ze zbrojeniem BFRP niezbędna jest analiza przyczepności prętów do betonu. Przyrost ugięcia po zarysowaniu jest liniowy w stosunku do przyrostu obciążenia aż do zniszczenia belki.

Rozpatrując zastosowanie wytycznych ACI 440.1R-06 w kontekście praktyki inżynierskiej, z uwagi na znaczne ugięcia belek powodujące przekroczenie warunków stanu granicznego użyteczności już przy 20% ich wyężenia, różnice pomiędzy wynikami teoretycznymi i eksperymentalnymi można uznać za nieistotne. Obciążenia, przy których występują niezgodności wynikowych wartości odkształceń, są wielokrotnie większe od granicznych sił skutkujących niespełnieniem normowych warunków SGU.

Literatura

- ACI 440.1R-06 (2006). Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Committee 440. *American Concrete Institute*, USA.
- ACI 440.3R-04 (2004). A. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. ACI Committee 440. *American Concrete Institute*, USA.
- ASTM D7205M/D7205M-06 (2016). Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. Subcommittee: D30.10. *ASTM International*, USA.
- Artemenko S.E. (2003). Polymer composite materials made from carbon, basalt and glass fibers. Structure and properties. *Fiber Chemistry*, Vol. 35, 226-229.
- Banibayat P., Patnaik A. (2014). Variability of mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer bars manufactured by wet-layup method. *Materials and Design*, Vol. 56, 898-906.
- Bank L.C. (2006) Composites for Construction: Structural design with FRP materials. Wyd. 1. *John Willey and Sons LTD.*, 560.
- Borhan T.M. (2012). Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre. *Materials and Design*, Vol. 42, 265-271.
- Branston J, Das S., Kenno S., Taylor C. (2016). Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 124, 878-886.
- Elgabbas F., Ahmed E., Benmokrane B. (2015). Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures. *Construction and Building Materials*, Vol. 95, 623-635.
- EPSTAL - stal zbrojeniowa o wysokiej ciągliwości (2018). Pobrano z lokalizacji <http://epstal.pl>, (25.02.2018).
- Fiore V., Di Bella G., Valenza A. (2011). Glass-basalt epoxy hybrid composites for marine applications. *Material Design*, Vol. 32, 2091-2099.
- Godycki-Ćwirko T. (1982). *Mechanika betonu*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 344.
- Immana M., Thorhallsson M. R., Azraguea K. (2017). A mechanical and environmental assessment and comparison of basalt fibre reinforced polymer (BFRP) rebar and steel rebar in concrete beams. *Energy Procedia*, Vol. 111, 31-40.
- High C., Seliem H. M., El-Safty A., Rizkalla S. H. (2015). Use of basalt fibers for concrete structures. *Construction and Building materials*, Vol. 96, 37-46.
- Kabay N. (2014). Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Construction and Building Materials*, Vol. 50, 95-101.
- Sim J., Park C., Moon D. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures Composites, Part B. *Engineering*, Vol. 36, 504-512.
- Selejdak J., Brózda K. (2016). Zastosowanie kompozytów w budownictwie zrównoważonym, w: Wybrane zagadnienia inżynierii środowiska w budownictwie. *Wydawnictwo PZITB Oddział Opole*, Opole.
- Szarliński J., Winnicki A., Podleś K. (2002). Konstrukcje z betonu w płaskich stanach. Komputerowe wspomaganie analizy i projektowania. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków, 208.
- Urbański M., Łapko A., Garbacz A. (2013). Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures. *Procedia Engineering*, Vol. 57, 1183-1191.
- Urbański M. (2017). Ocena stanów naprężenia i odkształcenia w belkach z betonu zbrojonego prętami z włókien bazaltowych. Rozprawa doktorska. *Politechnika Warszawska*. Wydział Inżynierii Lądowej. Warszawa, 283.
- Wei B., Cao H., Song S. (2010) Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. *Materials Science and Engineering A*, 527, 4708-4715.

ANALYSIS OF DEFLECTION AND CRACKING OF CONCRETE BEAMS WITH NON-METALLIC REINFORCEMENT

Abstract: The behaviour of model beams made of concrete with basalt reinforcing bars (BFRP) in three-point bending test was analysed. The strength parameters of BFRP bars were tested. The bending capacity, deformation of concrete and beam deflection were determined. The obtained results were compared

with the results of the deflection calculation based on the ACI 440: 1R-06 standard. Crack propagation in the model beams under load was analysed using the Aramis 5M optical measuring system. Due to the strength characteristics of the composite reinforcing bars, the beams exhibited significant tensile strains, which resulted in the development of cracks of considerable width. A linear dependence of the model beam deflection versus load was observed. It has been found that the ACI 440: 1R-06 calculation procedure allows to determine deflections of beams reinforced with BFRP bars under short-term load.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach projektu badawczego finansowanego ze środków NCBiR pt. *"Innowacyjne hybrydowe zbrojenie kompozytowe FRP do konstrukcji infrastrukturalnych o podwyższonej trwałości"*, numer projektu PBS3/A2/20/2015 (ID 245084).

BUDOWA I ANALIZA MODELU NUMERYCZNEGO KONSTRUKCJI TEORETYCZNEGO OBIEKTU BUDOWLANEGO

Przemysław LAZAR*

Główny Instytut Górnictwa, plac Gwarków 1, 40-166 Katowice

Streszczenie: Artykuł przedstawia przebieg budowy i analizy obliczeniowej modelu kilkukondygnacyjnego budynku o konstrukcji ścianej poddanego standardowym obciążeniom budowlanym oraz oddziaływaniom górniczych deformacji podłoża w postaci poziomych odkształceń rozciągających podłoża górniczego i krzywizny wypukłej terenu górniczego. Proces modelowania budynku oraz jego analiza obliczeniowa wykonana została z wykorzystaniem programu Autodesk Robot Structural Analysis, który okazał się narzędziem przydatnym do wykonywania takich prac. Na podstawie wykonanej analizy obliczeniowej wykazano istotną rolę poziomych odkształceń rozciągających podłoża gruntowego w powodowaniu uszkodzeń obiektów budowlanych zlokalizowanych na terenach górniczych.

Słowa kluczowe: budynki, oddziaływania górnicze, analiza obliczeniowa.

1. Wprowadzenie

Stosowanie metod numerycznych przy projektowaniu obiektów budowlanych jest obecnie powszechne. Najczęściej do tego celu wykorzystywane są specjalistyczne programy obliczeniowe umożliwiające wykonywanie analiz statycznych i dynamicznych konstrukcji nośnej i usztywniającej obiektów, często rozbudowane o moduły umożliwiające także wymiarowanie poszczególnych elementów konstrukcyjnych obiektów (Starosolski, 2010). Programy numeryczne są również wykorzystywane do oceny wpływu oddziaływań górniczych na budynki (Fedorowicz L., 2006; Fedorowicz J., 2009; Szojda, 2009). Szczególne znaczenie ma odwzorowanie poziomych odkształceń terenu (Kwiatek, 2007; Kawulok, 2010). Przykładem takiego programu jest Autodesk Robot Structural Analysis (ARSA) oferujący bardzo szeroki zakres możliwości w zakresie modelowania i obliczania różnych typów i rodzajów konstrukcji budowlanych wraz z ich wymiarowaniem, umożliwiając faktycznie tworzenie projektów konstrukcyjnych budynków i innych obiektów budowlanych (Autodesk, 2010).

W niniejszym artykule przedstawiono przykład zastosowania programu Autodesk Robot Structural Analysis do analizy obliczeniowej budynku usytuowanego na terenie górnym. Przedmiotem rozważań był przykładowy budynek mieszkalny o wysokości trzech kondygnacji, w pełni podpiwniczony, zaprojektowany

w ścianej konstrukcji betonowej, poddany standardowym obciążeniom stałym i zmiennym oraz oddziaływaniom górniczym w postaci deformacji jego podłoża gruntowego, wyrażonego poziomymi odkształceniami rozciągającym oraz krzywizną terenu górniczego.

2. Budowa modelu budynku o ścianowym ustroju nośnym

Proces tworzenia modelu geometrycznego i statyczno-wytrzymałościowego rozpatrywanego budynku składał się z następujących etapów:

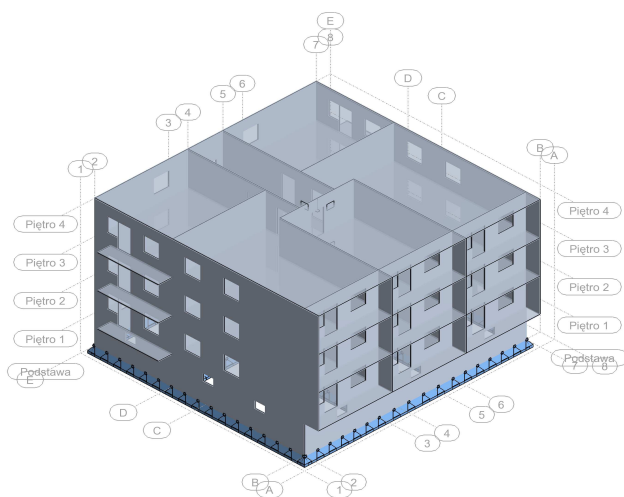
- zdefiniowanie osi konstrukcyjnych budynku w trzech kierunkach x , y , z ;
- zamodelowanie ścian konstrukcyjnych kondygnacji piwnic i stropu nad piwnicami;
- wykształcenie otworów okiennych i drzwiowych poprzez wykonanie odpowiedniej perforacji ścian konstrukcyjnych budynku;
- zamodelowanie kondygnacji parteru, w sposób analogiczny do kondygnacji piwnic;
- skopiowane kondygnacji parteru w poziomie I i II piętra budynku;
- korekta kształtu stropu nad II piętrzem;
- wygenerowanie modelu obliczeniowego budynku łącznie z przyjęciem siatki metody elementów skończonych, wykonywane automatycznie przez program ARSA.

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

Ściany piwniczne przyjęte zostały jako ściany z betonu o grubości 12 cm. W poziomie fundamentów zamodelowano sztywne podparcie ścian – tarcz na pełnych krawędziach dolnych, blokując wszystkie kierunki przemieszczeń: x, y, z oraz kąty obrotu względem osi: x-x, y-y, z-z. Połączenia pomiędzy poszczególnymi ścianami konstrukcyjnymi automatycznie zdefiniowane zostały jako sztywne. Płyta stropowa kondygnacji piwnic przyjęta została jako płyta betonowa o grubości 12 cm, z wykształconym otworem w miejscu usytuowania klatki schodowej. Elementy konstrukcyjne klatki schodowej oraz ściany działowe kondygnacji piwnic zostały pominięte w celu uproszczenia modelu budynku. Połączenia pomiędzy płytą stropową nad kondygnacją piwniczną a ścianami piwnicznymi wygenerowane zostały automatycznie jako przegubowe.

Elementy konstrukcyjne parteru budynku zamodelowano w sposób analogiczny do elementów piwnicy z tą różnicą, że płyta stropowa nad parterem objęła swoim zasięgiem także balkony i loggie. Kolejne piętra budynku uzyskano następnie poprzez skopiowanie wszystkich elementów parteru na nadległych kondygnacjach. W poziomie stropu nad II piętrem (poziom stropodachu budynku) dokonano korekty kształtu płyty stropowej rezygnując z otworu w miejscu usytuowania klatki schodowej oraz likwidując wspornikowe płyty balkonowe.

Opracowany model, który przyjęty został jako model podstawowy rozpatrywanego budynku, zaprezentowany został na rysunku 1. W ramach dokonanej analizy obliczeniowej oprócz modelu podstawowego analizowano również model dodatkowy, pozbawiony otworów okiennych i drzwiowych w ścianach konstrukcyjnych budynku.



Rys. 1. Podstawowy model budynku

3. Modelowanie obciążeń budynku

Obciążenia, jakim poddany został model budynku, podzielono na dwie kategorie: standardowe obciążenia budynków oraz oddziaływania górnicze. Obciążenia standardowe są typowymi obciążeniami obiektów

budowlanych oddziałującymi na obiekty na terenie całego kraju, niezależnie od tego, czy są to tereny górnicze czy niegórnicze. Do obciążeń tych należą:

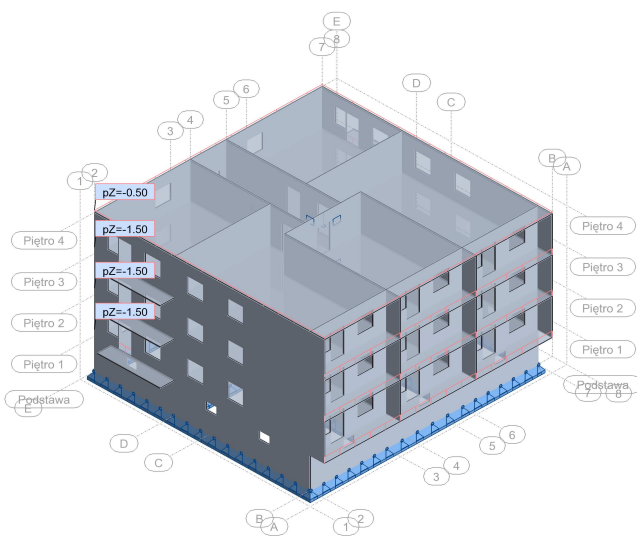
- obciążenia stałe (na przykład od ciężaru własnego),
- obciążenia zmienne długo- i krótkotrwałe (obciążenia użytkowe),
- obciążenia klimatyczne (śniegiem, wiatrem, itp.).

Obciążenie od ciężaru własnego dotyczy wszystkich elementów konstrukcyjnych zdefiniowanych w modelu i działa w kierunku osi „z” globalnego układu współrzędnych ze zwrotem w dół. Obciążenie to występuje jako obciążenie powierzchniowe, liniowe lub węzłowe o wartościach odpowiadających ciężarom zdefiniowanych elementów. Obciążenie to wygenerowane zostało automatycznie przez program ARSA.

Jako obciążenie użytkowe przyjęte zostało pionowe obciążenie stropów wszystkich kondygnacji modelu. Jest to obciążenie równomiernie rozłożone na stropach wszystkich kondygnacji modelu, o wartości:

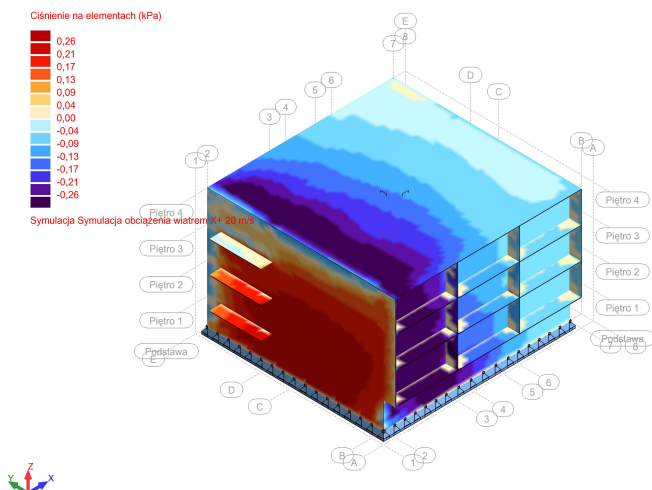
- 1,5 kN/m² – w przypadku stropów na piwnicą, parterem i I piętrem,
- 0,5 kN/m² – w przypadku stropu nad II piętrem, stanowiącego element stropodachu wieńczącego rozważany budynek.

Schemat obciążenia użytkowego pokazany został na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat obciążenia obciążeniem użytkowym

Obciążenie wiatrem wygenerowane zostało automatycznie przez program ARSA dla dwóch kierunków: równoległego do osi x oraz równoległego do osi y. W dalszej analizie przy tworzeniu kombinacji obciążeń wykorzystano bardziej niekorzystne obciążenie modelu wiatrem, działające równoległe do osi x. Schemat tego obciążenia zaprezentowany został na rysunku 3.

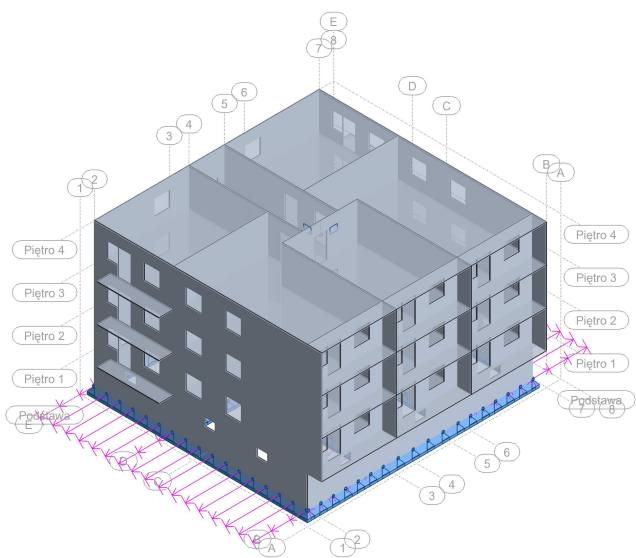


Rys. 3. Schemat obciążenia wiatrem wzdłuż osi x

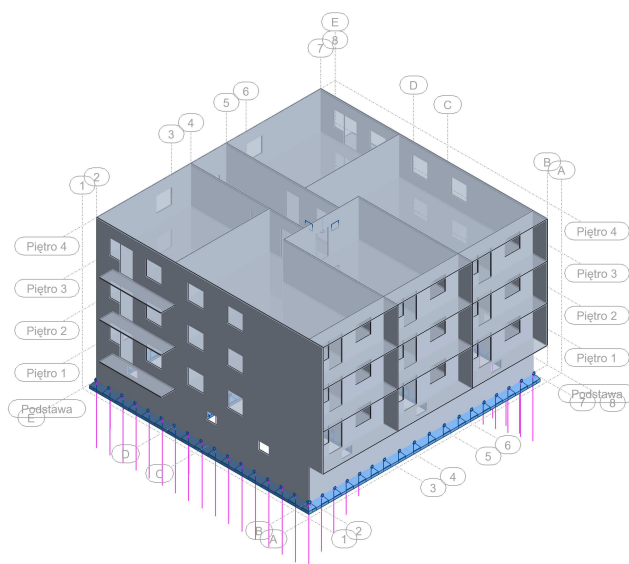
Do kategorii oddziaływań górniczych zaliczono oddziaływania przyłożone do dolnych krawędzi ścian w wyniku wpływów deformacji ciągłych podłoża górniczego. Oddziaływania te rozdzielono na:

- przemieszczenia poziome od poziomych odkształceń rozciągających ε powstających w podłożu obiektów budowlanych;
- przemieszczenia pionowe tego podłoża, w postaci krzywizny wypukłej powierzchni terenu o promieniu R .

Powyższe oddziaływania zamodelowane zostały w postaci wymuszonych przemieszczeń przyłożonych do węzłów siatki metody elementów skończonych, leżących w płaszczyźnie podstawy modelu budynku. Wartości tych oddziaływań wyliczono przy przyjęciu wskaźników deformacji terenu górniczego III kategorii, czyli dla wartości odkształceń poziomych $\varepsilon = 6,0$ mm/m oraz promienia krzywizny terenu $R = 6,0$ km (Ochrona obiektów, 1997). Schematy oddziaływań górniczych na elementy podstawy modelu pokazane zostały na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Schemat oddziaływania poziomych odkształceń podłoża



Rys. 5. Schemat oddziaływania krzywizny wypukłej terenu

4. Analiza obliczeniowa

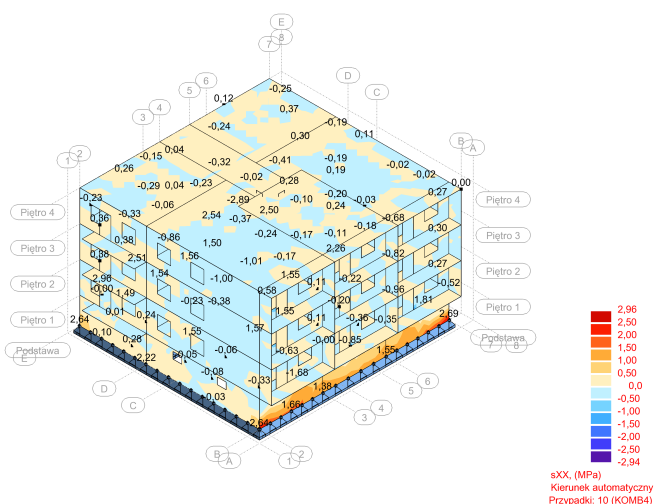
Analiza obliczeniowa rozpatrywanego modelu podstawowego budynku pod działaniem założonych obciążeń i oddziaływań przeprowadzona została dla:

- a) 6 przypadków prostych – obejmujących skutki indywidualnego oddziaływania poszczególnych rodzajów obciążeń na przyjęty model, a w szczególności:
 - obciążenie ciężarem własnym (P1),
 - obciążenie użytkowe (P2),
 - symulacja obciążenia wiatrem w kierunku osi x (P3),
 - symulacja obciążenia wiatrem w kierunku osi y (P4),
 - oddziaływania górnicze od rozpełzania gruntu e w kierunku równoległym do osi x (P5),
 - oddziaływania górnicze od wypukłej krzywizny terenu o promieniu R w kierunku równoległym do osi x (P6);
- b) 5 kombinacji obciążeń (przypadków złożonych) – utworzonych jako kombinacje dwóch do pięciu przypadków prostych obciążenia, a w szczególności:
 - kombinacja K1 (P7) – utworzona z przypadków P1 i P2,
 - kombinacja K2 (P8) – utworzona z przypadków P1, P2 i P3,
 - kombinacja K3 (P9) – utworzona z przypadków P1, P2, P3 i P5,
 - kombinacja K4 (P10) – utworzona z przypadków P1, P2, P3 i P6,
 - kombinacja K5 (P11) – utworzona z przypadków P1, P2, P3, P5 i P6.

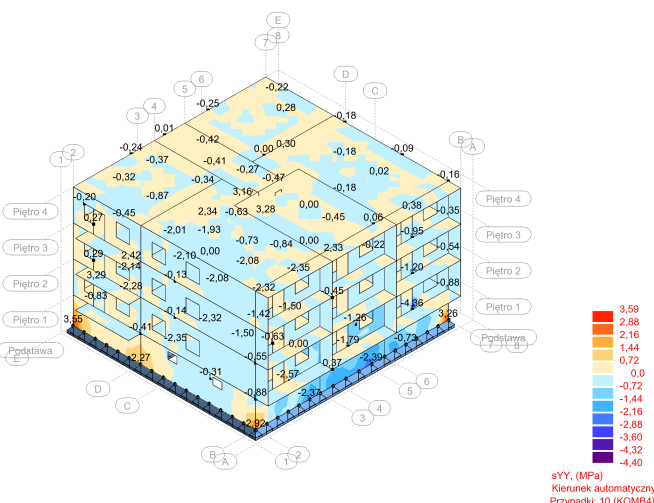
Obliczenia statyczne wykonane przy wykorzystaniu programu ARSA mogą być przez ten program prezentowane na wiele różnych sposobów, w tym między innymi w postaci:

- map izolinii naprężeń, normalnych σ_x , σ_y i τ_{xy} oraz głównych σ_1 , σ_2 ,
- map barwnych rozkładu naprężeń,
- wartości naprężeń podanych dla wybranych punktów siatki elementów skończonych modelu,
- odkształceń i przemieszczeń poszczególnych elementów i fragmentów modelu.

W wykonanej pracy skoncentrowano się na analizie rozkładu naprężeń normalnych przedstawionych na mapach barwnych rozkładu tych naprężeń w poszczególnych elementach modelu, wzbogaconych wartościami liczbowymi naprężeń w wybranych punktach modelu. Przykładowe rezultaty wykonanych obliczeń zaprezentowane zostały na rysunkach 6 i 7, odnoszących się do kombinacji K5 obciążeń.



Rys. 6. Wyniki analizy naprężeń σ_x od kombinacji oddziaływań złożonej z ciężaru własnego, obciążeń eksploatacyjnych, obciążeń wiatrem, poziomych odkształceń rozciągających i wypukłej krzywizny terenu



Rys. 7. Wyniki analizy naprężeń σ_y od kombinacji oddziaływań złożonej z ciężaru własnego, obciążeń eksploatacyjnych, obciążeń wiatrem, poziomych odkształceń rozciągających i wypukłej krzywizny terenu

5. Omówienie wyników przeprowadzonych obliczeń

Wyniki wykonanej analizy obliczeniowej rozpatrywanego modelu budynku dostarczyły licznych obserwacji i spostrzeżeń dotyczących rozkładu sił wewnętrznych w konstrukcji budynku znajdującego się pod działaniem poszczególnych obciążeń standardowych oraz oddziaływań o charakterze górniczym. Biorąc pod uwagę możliwość praktycznego wykorzystania otrzymanych rezultatów obliczeń pod kątem oceny wpływu oddziaływań górniczych na pracę statyczną analizowanego modelu budynku, w niniejszym artykule skoncentrowano się na określeniu rozkładu naprężeń normalnych, który wystąpił w ścianie nośnej kondygnacji piwnicy w osi B-B (ściana pod loggiami). Przy modelowaniu obciążeń budynku oddziaływania górnicze w postaci poziomego odkształcenia oraz krzywizny terenu przyjęto bowiem jako wpływy oddziałujące równoległe do osi x globalnego układu współrzędnych, czyli równoległe do osi konstrukcyjnej B-B.

Analizując mapy naprężeń normalnych, uzyskane dla wspomnianej ściany piwnic budynku stwierdzić można, że:

- w wyniku obciążenia modelu ciężarem własnym w kierunku poziomym powstały naprężenia o wartościach od $-0,05$ do $-0,20$ MPa, a w kierunku pionowym również naprężenia ściskające o wartościach od $-0,10$ do $-0,80$ MPa;
- w wyniku obciążenia modelu obciążeniem użytkowym w kierunku poziomym powstały naprężenia o wartościach od $-0,01$ do $-0,04$ MPa, a w kierunku pionowym również naprężenia ściskające i rozciągające o wartościach od $-0,01$ do $-0,16$ MPa;
- w wyniku obciążenia modelu obciążeniem wiatrem w kierunku poziomym powstały naprężenia ściskające i rozciągające o wartościach od $-0,01$ do $+0,01$ MPa, a w kierunku pionowym również naprężenia ściskające o wartościach od $-0,01$ do $+0,02$ MPa;
- w wyniku obciążenia modelu oddziaływaniem poziomych odkształceń rozciągających podłoża (jak dla terenów górniczych III kategorii) w kierunku poziomym powstały naprężenia rozciągające o wartościach od $0,0$ do $+2,40$ MPa, a w kierunku pionowym naprężenia ściskające i rozciągające o wartościach od $-0,01$ do $+1,50$ MPa;
- w wyniku obciążenia modelu oddziaływaniem wypukłej krzywizny terenu (jak dla terenów górniczych III kategorii) w kierunku poziomym powstały naprężenia rozciągające o wartościach od $0,0$ do $+0,08$ MPa, a w kierunku pionowym naprężenia ściskające i rozciągające o wartościach od $-0,09$ do $+0,13$ MPa.

Z porównania podanych powyżej wartości naprężeń wynika wniosek, że głównym czynnikiem mogącym powodować wystąpienie uszkodzeń rozpatrywanej ściany konstrukcyjnej kondygnacji piwnic są poziome odkształcenia podłoża górniczego obiektu.

Z wykonanej analizy obliczeniowej wynika, że łączne wpływy wszystkich rozpatrywanych obciążeń i oddziaływań wyrażać się będą powstaniem w kierunku

poziomym naprężen rozciągających od 0,0 do +2,69 MPa, a kierunku pionowym naprężen ściskających i rozciągających w przedziale od -2,39 do +3,26 MPa. Oznacza to, że powstały w rozpatrywanej ścianie rozkład naprężen normalnych jest zdominowany przez oddziaływanie poziomych odkształceń rozciągających podłoża górniczego.

6. Podsumowanie

Zrealizowane prace obejmujące budowę modelu kilkukondygnacyjnego budynku o konstrukcji ścianowej, poddanego obciążeniom standardowym oraz oddziaływaniom wpływów górniczych deformacji podłoża, w postaci odkształceń poziomych podłoża górniczego i krzywizny wypukłej terenu górniczego, a następnie wykonanie analizy obliczeniowej rozkładu sił wewnętrznych w przyjętym modelu, wykazały przydatność programu Autodesk Robot Structural Analysis do tego typu prac i analiz.

Przyjęty do analiz budynku jest modelem mocno uproszczonym, zakładającym wykonanie całego modelu w konstrukcji betonowej, bez udziału elementów żelbetowych, takich jak ławy fundamentowe, nadproża okienne i drzwiowe, a także stropowe płyty żelbetowe, pojedynczo lub krzyżowo zbrojone. Wynika stąd, że celowe są dalsze prace nad doskonaleniem sposobu modelowania budynków przy wykorzystaniu programu ARSA i lepszym uwzględnieniu zagadnień kontaktowych budowla – podłoża górnicze.

Uzyskane wyniki obliczeń pozwalają również na stwierdzenie, że wpływ poziomych odkształceń rozciągających podłoża górniczego na możliwość wystąpienia uszkodzeń elementów konstrukcyjnych budynków jest bardzo istotny.

Literatura

- Autodesk Inc., (2010). Robot Structural Analysis Professional 2010 Training Manual - Metric Version. Autodesk Inc., USA.
- Fedorowicz J. (2009). Zagadnienia kontaktowe budowla – podłoża gruntowe. Część II: Kryteria tworzenia i oceny modeli obliczeniowych układów konstrukcja budowlana – podłoża górnicze. *Budownictwo*, Zeszyt Naukowy Nr 114, Politechnika Śląska, Gliwice.
- Fedorowicz L. (2006). Zagadnienia kontaktowe budowla – podłoża gruntowe. Część I: Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień kontaktowych konstrukcja budowlana – podłoża gruntowe. *Politechnika Śląska*, Zeszyt Naukowy Nr 1729, Gliwice.
- Kawulok M. (2010). Szkody górnicze w budownictwie. *Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej*, Warszawa.
- Kwiatek J. (2007). Obiekty budowlane na terenach górniczych. *Wydawnictwo Głównego Instytutu Górniczego*, Katowice.
- Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych (1997). Praca zbiorowa pod red. J. Kwiatek. *Wydawnictwo Głównego Instytutu Górniczego*, Katowice.
- Starosolski W. (2010). Komputerowe modelowanie betonowych ustrojów inżynierskich, Wybrane zagadnienia, Tom 1 i 2. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.
- Szozda L. (2009). Analiza numeryczna wpływu nieciągłych deformacji podłoża na budynki ścianowe. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.

CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF THE NUMERICAL MODEL OF THE THEORETICAL BUILDING STRUCTURE

Abstract: The article presents the process of building and computational analysis of a multi-storey building model with a wall structure subjected to standard construction loads and mining effects of deformation of the substrate in the form of horizontal deformations of the mining substrate and the curvature of the convex mining area. The building modelling process and its computational analysis were made using the Autodesk Robot Structural Analysis software, which proved to be a useful tool for doing such work. On the basis of computational analysis, the importance of horizontal deformations of the ground substrate has been shown to cause damage to buildings located in mining areas.

ALOE VERA – WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI BIOLOGICZNE

Marzena MATEJCZYK*, Aleksandra GOLONKO, Ewelina CHILMON

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

Streszczenie: Aloe jako ludowy medykament o wszechstronnych właściwościach prozdrowotnych jest znany ludzkości od setek lat. Ekstrakty aloesowe cieszą się ogromnym zainteresowaniem farmakologów, medyków oraz kosmetologów. Wykazano, że poszczególne składniki żelu aloesowego są antyoksydantami, stymulantami aktywności układu immunologicznego, mają właściwości antynowotworowe, obniżające poziom cukru i lipidów we krwi, a także wpływają pozytywnie na gojenie się ran czy oparzeń i działają przeciwzapalnie. Ostatnio opublikowano kilka znaczących prac, w których wykazano silne właściwości antyrakowe wybranych składników aloesu. Stąd, amerykańska FDA (ang. *Food and Drug Administration*) poparła projekty badań naukowych dotyczących zastosowania *A. vera* w leczeniu raka i AIDS u ludzi. W prezentowanej pracy przedstawiono ogólny skład żelu aloesowego wraz z najbardziej aktywnymi biologicznie substancjami. Scharakteryzowano aktywność antyoksydacyjną i przeciwdrobnoustrojową Aloesu, potencjalne działanie antynowotworowe oraz przedstawiono wpływ żelu aloesowego na przewod pokarmowy człowieka, przemiany węglowodanów, układ immunologiczny i proces gojenia się ran.

Słowa kluczowe: *Aloe vera*, biologiczna aktywność, działanie antynowotworowe.

1. Wprowadzenie

Sucha masa liści aloesu zawiera około 270 różnych składników, z których część charakteryzuje się wysoką aktywnością biologiczną. Głównym komponentem, którego zawartość wynosi ponad 73% suchej masy aloesu jest błonnik pokarmowy oraz części niepalne stanowiące 16,9%. Ilość kwasów tłuszczowych, głównie: arachidonowych, linolowych, linolenowych, mirystynowych, kaprylowych, palmitynowych i stearynowych, dochodzi do 2,9%. W surowym miąższu aloesu występuje niemalże 98,5% wody, jego pH wynosi 4,5. Reszta stałego materiału określana na 0,5-1% (według niektórych źródeł do 4%) składa się z szeregu bardzo różnorodnych pod względem chemicznym związków, do których zaliczamy między innymi: taniny, saponiny, flawonoidy, steroidy, terpenoidy czy antrachinonowe połączenia glikozydów nasercowych (Anthiban i in., 2012; López i in., 2013). Ponadto, do aktywnych biologicznie substancji należą także obecne w Aloesie: enzymy, witaminy, aminokwasy egzogenne i endogenne dla człowieka, węglowodany, kwasy tłuszczowe i inne, z czego najważniejsze w znaczeniu medycznym wydają się antrachinony (Kumar i Yadav, 2014). Kolejną grupę stanowią witaminy, a spośród nich głównie: witaminy A, C i E o właściwościach antyoksydacyjnych, witamina B₁₂, kwas foliowy i cholina. Aloe jest również dosyć bogaty w minerały biorące udział we właściwym funkcjonowaniu enzymów i będące

również antyoksydantami, należą do nich: wapń, chrom, miedź, selen, magnez, mangan, potas, sód i cynk. Składniki aktywne aloesu takie jak antrachinony, hormony, polisacharydy i enzymy są odpowiedzialne za aktywność przeciwnowotworową czy przeciwzapalną (Saini i in., 2010; Naveena i in., 2011; Sahu i in., 2013). Ze względu na cenne właściwości biologiczne dużym zainteresowaniem naukowym cieszą się należące do antrachinonów aloina i emodyna (ang. *Aloe-emodin* AE), oraz chrysofanol o silnej aktywności przeciwdrobnoustrojowej. Ogólnie szacuje się, że do tej pory wyizolowano i opisano 12 różnych antrachinonów pochodzenia aloesowego. To właśnie aloinie i emodynie przypisuje się najsilniejsze działanie przeciwnowotworowe i przeciwzapalne (El-Shemmy i in., 2010; López i in., 2013). Cennym składnikiem żelu aloesowego są również polisacharydy, wykazujące aktywność immunomodulacyjną, ponadto zwiększają poziom insuliny i obniżają poziom glukozy we krwi (Kuo i in., 2002; Lissoni i in., 2009; Raksha i in., 2014; Sahu i in., 2013). Żel *Aloe vera* bogaty jest głównie w takie polisacharydy jak acemannan. W tabeli 1 przedstawiono aktywność biologiczną wybranych związków chemicznych występujących w *Aloe vera*.

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

Tabela 1. Wybrane związki chemiczne występujące w *Aloe vera* i ich aktywność biologiczna. Opracowanie własne na podstawie (Kumar i Yadav, 2014; Raksha i in., 2014; Singh i in., 2010; Zamiara, 2010).

Związki chemiczne w <i>Aloe vera</i>	Grupa związków	Aktywność biologiczna	Główne molekularne mechanizmy działania
Aloina (barbaloina)	Antrachinony	Wykazuje aktywność antyoksydacyjną, przeciwzapalną, efekt antyproliferacyjny, indukuje zatrzymanie cyklu komórkowego i śmierć apoptyczną komórki w nowotworowych liniach ludzkich. Ponadto udowodniono, że aloina jest inhibitorem angiogenezy guzów nowotworowych.	<ul style="list-style-type: none"> - inhibicja szlaku sygnałowego NF-κB; - blokowanie fosforylacji, acetylacji oraz jądrowej translokacji podjednostki NF-κB p65; - regulacja ekspresji genów odpowiedzi stresowej; - ochrona makrofagów przed LPS-indukowaną odpowiedzią zapalną i apoptozą; - blokowanie aktywacji STAT3
Aloe-emodyna	Antrachinony	Wykazuje <i>in vitro</i> silne działanie antynowotworowe.	<ul style="list-style-type: none"> - inhibicja angiogenezy nowotworu trzustki; - wpływa na ekspresję c-myc w nowotworze żołądka; - indukcja zatrzymania cyklu komórkowego; - indukcja apoptozy
Aloezyna	Związki fenolowe	Wykazuje właściwości przeciwzapalne, ochronne przed działaniem ultrafioletu, przeciwbakteryjne i przeciwnowotworowe.	<ul style="list-style-type: none"> - jest inhibitorem cyklu komórkowego; - indukuje apoptozę; - hamuje migrację i inwazję komórek i nowotworowych oraz rozwój guzów nowotworowych; - oddziałuje na szlak sygnałowy MAPK

2. Właściwości antyoksydacyjne Aloesu

W Aloesie wykryto liczne związki chemiczne mające właściwości antyoksydacyjne, należą do nich związki fenolowe, enzymy odpowiedzialne za antyoksydacyjną ochronę komórek przed utlenianiem – peroksydaza glutationowa oraz dysmutaza ponadtlenkowa (Nadhlala i in., 2009; Kumar i Yadav, 2014). Badania nad metanolem, 95% etanolem, heksanem, acetonem oraz chloroformem roztworem ekstraktu żelu aloesowego dowiodły, że roztwory metanole i acetonowe posiadają maksymalne efekty wychwytywania rodnika DPPH i rodników nadtlenkowych. Ponadto, w odniesieniu do wieku rośliny i zawartości w niej polisacharydów i flawonoidów, określono aktywność przeciwutleniającą, gdzie dowiedziono, że wyciąg z trzyletniej rośliny wykazuje największą aktywność antyoksydacyjną (Saini i in., 2010; Adhiban i in., 2012; Rahmani i in., 2015). Działanie przeciwutleniające stwierdzono także na organizmach modelowych gryzoni chorych na cukrzycę, którym w żywieniu regularnie podawano liście Aloesu. Otrzymane w tym eksperymencie wyniki wykazały zwiększoną aktywność enzymów antyoksydacyjnych i zmniejszoną zawartość produktów peroksydacji lipidów w tkankach zwierząt. Podwyższony poziom cukru we krwi prowadzi do nasilenia stresu oksydacyjnego. Dowiedziono, że ekstrakty *Aloe vera* działają hipoglikemicznie, obniża również narażenie komórek na stres oksydacyjny (Raksha i in., 2014; Cieślak i Turcza 2015). Silnymi antyoksydantami, choć występującymi w Aloesie w niewielkich ilościach, są: witamina C, witamina E, karotenoidy, flawonoidy i taniny. Uważa się, że antyoksydacyjna aktywność

komponentów *Aloe vera* jest głównym mechanizmem biologicznym nadającym tej roślinie właściwości lecznicze (Radha i Laxmipriya, 2015).

3. Aloes w leczeniu nowotworów

Jednym z najważniejszych zagadnień omawianym w literaturze naukowej jest działanie przeciwnowotworowe Aloesu. Badania naukowe dowiodły, że aloesowe frakcje polisacharydowe hamują wiązanie benzopirenu z hepatocytami w organizmach szczurzych, przez co przyczyniają się do zapobiegania powstawaniu potencjalnie rakotwórczych adduktów DNA z benzopirenem (Lissoni i in., 2009; Huang i in., 2013; Boudreau i in., 2013). Wykazano również, że żel aloesowy wspomaga działanie układu odpornościowego w walce z nowotworami. Do tej pory udowodniono również, że emodyna, ze względu na wysoką aktywność cytotoksyczną względem komórek nowotworowych, jest potencjalnym składnikiem nowych leków onkologicznych (Pecere i in., 2000; Liu i in., 2013). Po raz pierwszy antynowotworowy potencjał emodyny przedstawiono w pracy Pecere i in. (2000), gdzie zarejestrowano skuteczne zahamowanie wzrostu neurochromatycznego guza po zadziałaniu emodyny. Dotychczasowe badania wykazały zróżnicowaną wrażliwość różnych typów nowotworów na emodynę. Wysoką podatność w stosunku do aloesowej emodyny wykazały komórki neuroblastomy oraz mięsaka Ewinga, podczas gdy nowotwory krwi i nabłonkowe były odporne na działanie tej substancji (Pecere i in., 2000). Inny z aloesowych antrachinonów – aloina, wykazuje chemoprotekcyjne działanie

na uszkodzenia preneoplastyczne wywołane 1,2-dimetylohydrazyną okrężnicy szczurów. Kuracja preparatem aloiny hamuje wydzielanie czynnika wzrostu śródbłonka naczyniowego (VEGF), który jest jednym z najważniejszych proangiogennych cytokin znanych jako induktor neowaskularyzacji nowotworów (Suboj i in., 2012; Radha i Laxmipriya, 2015).

Obecnie w literaturze światowej pojawia się coraz więcej prac dotyczących biologicznej aktywności ekstraktów aloesowych lub poszczególnych ich komponentów. Autorzy prac zaprezentowali wielokierunkową aktywację komórkowych szlaków transdukcji sygnału pod wpływem Aloesu. Prawdopodobnie kaskada reakcji komórkowej będąca odpowiedzią na składniki Aloesu rozpoczyna się aktywacją receptorów komórkowych, a następnie szlaków MAPK i PI3K-AKT, łącznie z wpływem na regulację cyklu komórkowego i apoptozę (López i in., 2013; Sanchez-Machado i in., 2017).

4. Wpływ Aloesu na układ odpornościowy, poziom glukozy i proces gojenia się ran

Aloes zwyczajny odgrywa także ważną rolę w funkcjonowaniu układu odpornościowego. Suplementacja organizmu aloesem prowadzi do zwiększenia żywotności komórek makrofagów oraz skuteczności w obronie przed patogenami. W badaniach nad linią komórkową makrofagów myszy zauważono stymulujące działanie acemannanu na produkcję cytokin, komórek biorących udział w odpowiedzi immunologicznej. W porównaniu z innymi polisacharydami zawartymi w Aloesie, charakterystyczną dla acemannanu reakcją wydaje się stymulacja odpowiedzi antygenowej ludzkich limfocytów oraz tworzenie się leukocytów w śledzionie i szpiku kostnym u napromieniowanych myszy. Efekt immunomodulacyjny aloesu nie jest związany tylko i wyłącznie z acemannanem, ale również z glikoproteinami w tym lektyną. Ze względu na stymulujący efekt aktywności immunologicznej komórek ekstrakty aloesowe wydają się być bardzo pomocne w terapii chorych na AIDS (Lin i Uen 2010; Singh i in., 2010). Biostymina będąca wyciągiem wodnym z liści *Aloe arborescens* jest znanym od wielu lat stymulatorem mechanizmów obronnych organizmu. Mocną pozycję na rynku mają również preparaty aloesowe. Leki otrzymane z uprawianego w Polsce Aloesu drzewiastego należą do najpowszechniej stosowanych od dziesięcioleci środków immunostymulujących. Duże znaczenie aloesu zwyczajnego (*A. vera*) w krajach Europy Zachodniej można porównać ze znaczeniem aloesu drzewiastego (*A. arborescens*) w Polsce (Cieślik i Turcza, 2015).

Kolejne badania dowodzą przeciwcukrzycowej aktywności aloesu (Kumar i Yadav, 2014). U myszy z tą przypadłością przeciwcukrzycowe działanie wykazało pięć fitosteroli Aloesu. Aloes zawiera polisacharydy zwiększające poziom insuliny i wykazujące właściwości hipoglikemiczne. Ekstrakt z gumy aloesowej zwiększa

tolerancję komórek na glukozę u szczurów zdrowych, jak i z cukrzycą (Sahu i in., 2013).

Wykazano również, że występujące w żelu aloesowym polisacharydy, głównie acemannan przyspieszają proces gojenia się ran poprzez zwiększenie syntezy kolagenu oraz biorą udział w wytwarzaniu kwasu hialuronowego i hydroksyproliny w fibroblastach, odgrywając znaczącą rolę w przebudowie macierzy zewnątrzkomórkowej i gojeniu się ran (Attah i in., 2015; Radha i Laxmipriya, 2015). Ponadto, badania na szczurach wykazały zdolność acemannu do aktywacji makrofagów biorących udział w odpowiedzi na uszkodzenie tkanek (Lee i in., 2001; Chen i in., 2004; Badakhsh i in., 2016). Aloes zwyczajny jest naturalnym źródłem związków wykazujących działanie przeciwwzapalne (Rahmani i in., 2015).

5. Aloes w leczeniu schorzeń przewodu pokarmowego

Aloe vera jest powszechnie stosowanym i znanym ze skuteczności naturalnym produktem w walce z wieloma różnorodnymi schorzeniami przewodu pokarmowego, szczególnie polecany jest na dolegliwości trawienne i w leczeniu wrzodów żołądka. Dowiedziono, że Aloes wykazuje właściwości antybakteryjne przeciwko szczepom *Helicobacter pylori*, który odpowiedzialny jest za stany zapalne, głównie górnego odcinka układu pokarmowego (Radha i Laxmipriya, 2015; Rahmani i in., 2015). Ponadto wykazano hepatoprotekcyjne działanie suplementacji aloesowej. Choroby wątroby są jednym z poważniejszych problemów zdrowotnych w dzisiejszych czasach. Wiąże się to między innymi z powszechnym spożyciem leków jak paracetamol czy ibuprofen, które często są głównymi sprawcami uszkodzeń czy marskości wątroby. Badania wykazują, że suplementacja pacjentów żelem aloesowym skutkuje zmniejszeniem uszkodzeń wątroby wywołanych tetrachlorkiem węgla (Chandan i in., 2007). Inne dane wskazują na korzystny wpływ acemannanu na alkoholowe uszkodzenia wątroby (Cui i in., 2013). Fitosterole jak lifenol i cykloartenol zdolne są do pobudzania regresji syntezy kwasów tłuszczowych i zwiększania poziomu utlenienia kwasów tłuszczowych w wątrobie, co powoduje ubywanie tłuszczu w jamie brzusznej i poprawę wartości wskaźników hiperlipidemii (Radha i Laxmipriya, 2015).

6. Antydrobnoustrojowe działanie Aloesu

Aloes zwyczajny wykazuje również działanie antybakteryjne, antywirusowe i przeciwwgrzybicze. Antrachinony zawarte w Aloesie działają analogicznie, jak tetracyklina – antybiotyk o szerokim spektrum antybakteryjnym, która hamuje bakteryjną syntezę białek, blokując miejsce aminoacylowe (miejsce A), w rybosomach, gdzie cząsteczki tRNA przyłączają się do mRNA (Pandey i Mishra 2010; Radha i Laxmipriya, 2015; Sanchez-Machado i in., 2017). Dane z literatury przedstawiają aktywność hamującą rozwój bakterii przez Aloes wobec między innymi: *Pseudomonas*

aeruginosa, *Streptococcus pyogenes*, *Streptococcus faecalis*, *Mycobacterium fortuitum*, *Mycobacterium smegmatis*, *Mycobacterium kansasii*, *Mycobacterium tuberculosis*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella typhi* (Fani i Kohanteb, 2012; Sahu i in., 2013). Udowodniono także, że żel aloesowy utrudnia wzrost grzyba *Candida albicans*. Aloes jest aktywny również wobec grzybów z rodzaju *Colletotrichum*. W odniesieniu do zahamowania wzrostu *Colletotrichum gloeosporioides* i *Cladosporium cucumerinum* największy udział ma aloina i aloemodyna. Ponadto wykazano przeciwwirusowe działanie aloemodyny względem wirusa ospy i grypy. Żel aloesowy łagodzi także zmiany wywołane działaniem wirusa opryszczki (Kathuria i in., 2010; Philip i in., 2012; Nejatizadeh-Barandozi, 2013). Poza opisanymi powyżej właściwościami Aloesu zwyczajnego dodatkowo należy wymienić: działanie przeczyszczające, przeciwko starzeniu się skóry, jej ochronę przed promieniami słonecznymi, skutkami oparzenia i odmrożenia. W dermatologii preparaty aloesowe wykorzystywane są, jako środki oczyszczające, nawilżające i ściągające. Natomiast w stomatologii, na bazie aloesowego acemannu stosuje się kleje i preparaty aloesowe zmniejszające obrzęk tkanek miękkich, co minimalizuje krwotoki z dziąseł. Dodatkowo Aloes sprawdza się również w dolegliwościach reumatycznych poprzez łagodzenie bólu stawów i mięśni (Irshad i in., 2011; Nayak i in., 2011; Manvitha i Bidya, 2014).

7. Podsumowanie

Badania ostatnich lat prowadzone na zwierzętach oraz zwierzęcych i ludzkich liniach komórkowych wskazują na znaczny potencjał biologiczny ekstraktów oraz poszczególnych komponentów *A. vera*. Aloes jest jedną z najbardziej atrakcyjnych pod względem medycznym roślin, stosowaną od zamierzchłych czasów przez człowieka. Roślina ta cieszy się ogromnym zainteresowaniem farmakologów oraz kosmetologów. Aloes charakteryzuje się wszechstronnym działaniem na organizm człowieka. Wykazuje właściwości przeciwzapalne, przeciwnowotworowe, antyoksydacyjne, przeciwdrobnoustrojowe, immunomodulacyjne, obniżające poziom cukru i lipidów we krwi, wpływa pozytywnie na gojenie się ran i oparzeń. W świetle dotychczasowych badań naukowych Aloes jest obiecującym środkiem leczniczym o wielu zastosowaniach. Potrzebne są dalsze badania z zastosowaniem specjalistycznych metod analitycznych, jak: wysokosprawna chromatografia cieczowa, wysokosprawna chromatografia cienkowarstwowa i magnetyczny rezonans, mających na celu izolację i charakterystykę chemiczną bioaktywnych składników Aloesu. Celem opracowania stosowanych w lecznictwie leków, na bazie aktywnych komponentów Aloesowych należy również przeprowadzić badania kliniczne.

Ze względu na udokumentowane naukowo silne właściwości antyrakowe wybranych składników aloesu

amerykańska FDA (ang. *Food and Drug Administration*) poparła projekty badań naukowych dotyczących zastosowania *A. vera* w leczeniu raka i AIDS u ludzi.

Literatura

- Athiban P.P., Borthakur B.J., Ganesan S., Swathika B. (2012). Evaluation of antimicrobial efficacy of Aloe vera and its effectiveness in decontaminating guttapercha cones. *Journal of Conservative Dentistry*, Vol. 15, No. 3, 246-248.
- Attah M.O., Ishaya H.B., Chiroma M.S., Amaza D.S., Balogun S.U., Jacks T.W. (2015). Effect of *Tamarindus indica* (Linn) on the rate of wound healing in adult rabbits. *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences*, Vol. 14, Issue 8, 80-84.
- Badakhsh M., Bahador, R.S., Afrazandeh S.S., Arefi F. (2016). A natural medicine and its effects: A review article. *International Journal of Pharmacy and Technology*, Vol. 8, No. 3, 4790-4800.
- Boudreau M.D., Mellick P.W., Olson G.R., Felton R.P., Thorn B.T., Beland F.A. (2013). Clear evidence of carcinogenic activity by a whole-leaf extract of *Aloe barbadensis miller* (aloe vera) in F344/N rats. *Toxicological Sciences*, Vol. 131, Issue 1, 26-39.
- Chandan B.K., Saxena A.K., Shukla S., Sharma N., Gupta D.K., Suri K.A., Suri J., Bhadauria M., Singh B. (2007). Hepatoprotective potential of *Aloe barbadensis* Mill. against carbon tetrachloride induced hepatotoxicity. *Journal of Ethnopharmacology*, Vol. 111, Issue 3, 560-566.
- Chen H.C., Hsieh W.T., Chang W.C., Chung J.G. (2004). Aloe-emodin induced *In vitro* G2/M arrest of cell cycle in human promyelocytic leukemia HL-60 cells. *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 42, Issue 8, 1251-1257.
- Cieślak E., Turcza K. (2015). Właściwości prozdrowotne aloesu zwyczajnego *Aloe vera* (L.) Webb. (*Aloe barbadensis* Mill.). *Postępy Fitoterapii*, Vol. 2, 117-124.
- Cui Y., Ye Q., Wang H., Li Y., Yao W., Qian H. (2013). Hepatoprotective potential of *Aloe vera* polysaccharides against chronic alcohol-induced hepatotoxicity in mice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 94, 1764-1771.
- El-Shemy HA, Aboul-Soud MA, Nassr-Allah AA, Aboul-Enein KM, Kabash A, Yagi A. (2010). Antitumor properties and modulation of antioxidant enzymes' activity by *Aloe vera* leaf active principles isolated via supercritical carbon dioxide extraction. *Current Medicinal Chemistry*, Vol. 17, No. 2, 129-138.
- Fani M., Kohanteb J. (2012). Inhibitory activity of *Aloe vera* gel on some clinically isolated cariogenic and periodontopathic bacteria. *Journal of Oral Science*, Vol. 54, 15-21.
- Huang P.H., Huang C.Y., Chen M.C., Lee Y.T., Yue C.H., Wang H.Y., Lin H. (2013). Emodin and Aloe-Emodin Suppress Breast Cancer Cell Proliferation through ER α Inhibition. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, Vol. 37, 6123-6138.
- Irshad S., Butt M., Younus H. (2011). *In-Vitro* antibacterial activity of *Aloe Barbadensis* Miller (*Aloe Vera*). *International Research Journal of Pharmaceuticals*, Vol. 1, Issue 2, 59-64.
- Kathuria N., Gupta N., Manisha R., Prasad, Nikita (2010). Biologic effects of *Aloe Vera* gel. *The Internet Journal of Microbiology*, Vol. 9, No. 2, 1-6.
- Kumar S., Yadav J.P. (2014). Ethnobotanical and pharmacological properties of *Aloe vera*: A review. *Journal of Medicinal Plant Research*, Vol. 8, 1387-1398.

- Kuo P.L., Lin T.C., Lin C.C. (2002). The antiproliferative activity of aloe-emodin is through p53-dependent and p21-dependent apoptotic pathway in human hepatoma cell lines. *Life Sciences*, Vol. 71, Issue 16, 1879-1892.
- Lee H.Z., Hsu S.L., Liu M.C., Wu C.H. (2001). Effects and mechanisms of aloe-emodin on cell death in human lung squamous cell carcinoma. *European Journal of Pharmacology*, Vol. 431, Issue 3, 287-295.
- Lin K.Y., Uen Y.H. (2010). Aloe-emodin, an anthraquinone, in vitro inhibits proliferation and induces apoptosis in human colon carcinoma cells. *Oncology Letters*, Vol. 1, 541-547.
- Lissoni P., Rovelli F., Brivio F., Zago R., Colciago M., Messina G., Mora A., Porro G. (2009). A randomized study of chemotherapy versus biochemotherapy with chemotherapy plus Aloe arborescens in patients with metastatic cancer. *In Vivo*, Vol. 23, No. 1, 171-175.
- Liu P., Chen D., Shi J. (2013). Chemical Constituents, Biological Activity and Agricultural Cultivation of Aloe vera. *Asian Journal of Chemistry*, Vol. 25, 6477-6485.
- López A., de Tangil M.S., Vega-Orellana O., Ramirez A.S., Rico M. (2013). Phenolic constituents, antioxidant and preliminary antimycoplasmic activities of leaf skin and flowers of Aloe vera (L.) Burm. f. (syn. A. barbadensis Mill.) from the Canary Islands (Spain). *Molecules*, Vol. 18, No. 5, 4942-4954.
- Manvitha K., Bidya B. (2014). Aloe vera: a wonder plant its history, cultivation and medicinal uses. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, Vol. 2, No. 5, 85-88.
- Nayak V., Gincy T.B., Prakash M., Joshi C., Rao S.S., Somayaji S.N., Madhav N.V., Bairy K.L. (2011). Hepatoprotective activity of Aloe vera gel against paracetamol induced hepatotoxicity in albino rats. *Asian Journal of Pharmaceutical and Biological Research*, Vol. 1, 94-98.
- Nejatzadeh-Barandozi F. (2013). Antibacterial activities and antioxidant capacity of Aloe vera. *Organic and Medicinal Chemistry Letters*, Vol. 3, 5-21.
- Ndhkala A.R., Amoo S.O., Stafford G.I., Finnie J.F., Van Staden J. (2009). Antimicrobial, anti-inflammatory and mutagenic investigation of the South African tree aloe (Aloe barberae). *Journal of Ethnopharmacology*, Vol. 124, Issue 3, 404-408.
- Pandey R., Mishra A. (2010). Antibacterial activities of crude extract of Aloe barbadensis to clinically isolated bacterial pathogens. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol. 160, 1356-1361.
- Pecere T., Gazzola M. V., Mucignat C., Parolin C., Vecchia F.D., Cavaggioni A., Basso G., Diaspro A., Salvato B., Carli M., Palù G. (2000). Aloe-emodin is a new type of anticancer agent with selective activity against neuroectodermal tumors. *Cancer Research*, Vol. 60, 2800-2804.
- Philip J., John S., Iyer P. (2012). Antimicrobial activity of aloe vera barbedensis, daucus carota, emblica officinalis, honey and punica granatum and formulation of a health drink and salad. *Malaysian Journal of Microbiology*, Vol. 8, Issue 3, 141-147.
- Radha M.H., Laxmipriya N.P. (2015). Evaluation of biological properties and clinical effectiveness of Aloe vera: A systematic review. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, Vol 5, Issue 1, 21-26.
- Rahmani A.H., Aldebasi Y.H., Srikar S., Khan A.A., Aly S.M. (2015). Aloe vera: Potential candidate in health management via modulation of biological activities. *Pharmacognosy Review*, Vol. 9, Issue 18, 120-126.
- Raksha B., Pooja S., Babu S. (2014). Bioactive compounds and medicinal properties of Aloe vera L.: An update. *Journal of Plant Sciences*, Vol. 2, No. 3, 102-107.
- Sahu P.K., Giri D.D., Singh R., Pandey P., Gupta S., Shrivastava A.K., Kumar A., Pandey K.D. (2013). Therapeutic and Medicinal Uses of Aloe vera: A Review. *Pharmacology & Pharmacy*, Vol. 4, 599-610.
- Saini M., Goyal P.K., Chaudhary G. (2010). Anti-tumor activity of Aloe vera against DMBA/croton oil-induced skin papillomagenesis in Swiss albino mice. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology*, Vol. 29, Issue 2, 127-135.
- Sanchez-Machado D.I., Lopes-Cervantes J., Sendon R. (2017). Aloe vera: Ancient knowledge with new frontiers. *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 61, 94-102.
- Selva S. (2011). Antitumor activity of aloe vera against ehrlich ascitis carcinoma (eac) in swiss albino mice. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, Vol. 2, 400-409.
- Singh S., Sharma P.K., Kumar N., Dudhe R. (2010). Biological activities of Aloe vera. *International Journal of Pharmacy and Technology*, Vol. 2, No. 3, 259-280.
- Suboj P., Babykutty S., Srinivas P., Gopala S. (2012). Aloe Emodin Induces G2/M cell cycle arrest and apoptosis via activation of caspase-6 in human colon cancer cells. *Pharmacology*, Vol. 89, 91-98.
- Zamiara K. (2010). Aloes – jego tajemnicza moc. *Farmacja Polska*, Vol. 66, No. 7, 495-497.

ALOE VERA – SELECTED BIOLOGICAL PROPERTIES

Abstract: Aloe as a folk medicine with comprehensive health-promoting properties has been known to humanity for hundreds of years. Aloe extracts are very popular among pharmacologists, medics and cosmetologists. It was demonstrated that the individual components of the aloe gel are antioxidants, stimulants of the immune system, have anti-cancer properties, lower blood sugar and lipid levels, and have a positive effect on wound healing, burns and anti-inflammatory effects. Recently, several significant papers have been published in which strong anti-cancer properties of selected aloe components have been demonstrated. Hence, the American Food and Drug Administration (FDA) has endorsed scientific research on the use of *A. vera* in the treatment of cancer and AIDS in humans. In the presented review, the general properties of Aloe are discussed, biological activity and the potential anti-cancer activity of the main, most active components of this plant are presented.

Praca została zrealizowana w ramach pracy numer S/WBiŚ/3/2015 i sfinansowana ze środków na naukę MNiSW.

BIOLOGICAL DETERIORATION OF WOODEN STRUCTURES OF THE BIALYSTOK OPEN-AIR MUSEUM

Alona PEREBYNOS*, Tetyana KRYVOMAZ

Faculty of Engineering Systems and Ecology, Kyiv National University of Construction and Architecture,
Povitroflotsky Avenue 31, 03680 Kyiv, Ukraine

Abstract: The preliminary survey of the biodeterioration in the Bialystok open-air museum (Poland) shows that wooden buildings are in good condition and 92% of historical and architectural constructions were estimated to the second category of technical state. Buildings were examined to identify kinds of biological agents. The main biodeteriorations of wooden constructions were made by insects, lichens, algae films and colonies of microfungi. The comparison of the biodeterioration impact was made for the Bialystok open air museum and the skansen "Pyrogovo" (Ukraine). The probability of germination on the wooden structures of some species of fungi has been calculated taking into account the temperature conditions of the north-eastern region of Poland.

Key words: open-air museum, wooden buildings, biological deterioration, mycological damage.

1. Introduction

The open-air museum is a category of museums in which the collection of buildings and artefacts are exhibited out-of-doors. The first open-air museum in the world and is located on the island Djurgården in Stockholm, Sweden, called "skansen". It was founded in 1891 by Artur Hazelius to show the way of life in the different parts of Sweden before the industrial era. Later the name "skansen" has also been used as a noun to refer to other open-air museums and collections of historic structures. European open-air museums are variously known as skansen, museums of buildings and, sometimes, folk museums (Bashkatov and Terpylovsky, 2011; Rentzhog, 2007).

Until today, the open-air museum has been one of the most common ways to preserve the cultural heritage of the people. Skansen is a research institution that collects, studies and documents in detail the monuments of material and spiritual culture. In addition, many of these museums are cultural and educational centers, where museum activities cover only part of their overall development program (Danyliuk, 2006).

The objectives of this work is to assess the impact of biodeterioration on wooden buildings in the Bialystok Open-Air Museum, in order to promote the preservation of architectural and historical values in its original and holistic form from the destruction.

2. The Bialystok Open-Air Museum

2.1. Description

Bialystok Open-Air Museum is the Branch of Podlaskie Museum in Bialystok, where situated the historic wooden architecture of Podlasie countryside. In the skansen, there are residential (cottages, manor houses, blackcaps, forester's houses), farm buildings (barns, granaries, stables, livestock buildings, etc.), included the small architecture (crosses, shrines, wells, dings) and three windmills. The Bialystok Open-Air Museum is developing constantly by moving new buildings from the area of Podlaskie district. Bialystok Open-Air Museum was founded in 1982 as the Department of the District Museum in Bialystok. The projects of wooden construction protection in the region of Bialystok by creation a museum like the heritage park was established in the sixties. For the heritage park museum a "village" form was chosen as the most fully reflecting the natural cultural landscape of villages in north-eastern Poland.

In 1984 the first building was moved into the museum- it was the forge from the Grodek. An intensive construction works were continued until 1991, when the funds for the further development of the museum were limited. A forest farm and nobleman's hamlet was reconstructed there. It also managed to move the manor with a granary to the future sector presenting manor building. A windmill, a water mill and a smithy was also moved to the heritage park. To the beginning

* Corresponding author, e-mail: alenaperebinos@gmail.com

of the nineties almost thirty buildings were successful moved into the museum.

In November 1994 a fire broke out, nine buildings completely burned down, the tenth were survived, but intended only for non-exhibition use. The heritage park area was limited to approximately thirty hectares. This appreciable reduction of the museum area allowed to fence and secures many buildings of emergency installations. Since the end of the nineties, the architectural buildings started moving to the heritage park again (Gawel, 2012).

2.2. Biological damage of wooden structures

The museum wooden structures in the process of storage expose to a number of adverse internal and external factors. The internal factors include technological properties and features of the wood; conditions and mode of storage belong to the external factors. The main environmental factors, that promote and exacerbate the development of mycological damages, primarily include increased humidity and temperature range 20-22°C and above, the lack of the ventilation and natural light, as well as increased air pollution (Koval and Mytkivska, 2011).

Falling to the surface of structures, fungi produce enzymes in its process of life that in the interaction with components of construction wooden materials turn them into more available organic compounds (water and carbon dioxide). Usually the end result of the mycodamage process is the destruction of organic matter, i.e. change the anatomical structure of the material and the loss of proper physical and mechanical properties (Varchenko, 2014; Knyazeva, 2005).

The reason for the appearance of the mycological factor is the combination of the natural process of aging wood with the operational process of construction and dangerous environmental factors. Mycological damage is much more relating to the storage conditions of architecture construction than to the nature of the wooden material. Thus, the state of museum wooden structures depends on the level of preventive measures, which requires regular mycological examination to prevent the development of mycological destructor.

3. Materials and methods

During the inspection of buildings we followed an algorithm of the monitoring of historical monuments, which was developed during the research in the museum "Pyrogovo". The algorithm consists of the following items: observation, analysis, assessment and comparison of results. In this study the first stage of the algorithm – "observation" has been performed (Perebnyos, 2015). The primary inspection of buildings has been carried out to identify the biological damage in general.

The stage consisted of visual inspection of buildings and description of the studied architecture construction. The following elements of buildings have been examined carefully because they belong to highly probable areas

of the destruction by biological agents: joints of logs, girders and boards, knots and cracks of wooden parts of structures, places without natural light and ventilation, attics, places near the surface of the soil, under the roof, etc. Characteristic features of mechanical (cracks, crumbling, peeling), entomological (holes of beetles, web) and other biological (fungi colony and marks, algae films, discoloration of wood) damages has been marked during the examination.

Twelve buildings of the forestry and manorial sectors of the Bialystok Open-Air Museum have been involved. There were taken to research: a forester's house from Lipniak, a barn from Karczmisko, a granary from Karczmisko, a stable from Karczmisko, a blackcap from Krusznik near Wigry, a barn from Wdowin, a livestock building from Krusznik, a cottage from Jacowlany, a granary from Lewki, a cottage from Stara Grzybowski, a barn from Nowy Ostrów near Krynki and a manor from Bobra Wielka.

4. Results and Discussion

On external structures of the blackcap from Krusznik near Wigry (the 20th century) and the barn from Nowy Ostrów near Krynki (the 19th century) were observed such biological damages as result of entomological activity, black spotted colony of fungi and lichenthallus. The cottage from Stara Grzybowski (the 19th century), the manor from Bobra Wielka (the 19th century) and the granary from Lewki (between the 19th and 20th centuries) had slight entomological damages and black spotted colony of fungi. Slight entomological damages and algae films were also found on external structures of the forester's house from Lipniak (20s of the 20th century). Following buildings had only slight entomological damages: the cottage from Jacowlany (second half of the 19th century), the barn from Karczmisko (the beginning of the 20s of the 20th century), the barn from Wdowin (20s of the 20th century), the granary from Karczmisko (about 1920) and the stable from Karczmisko (1925). And only the livestock building from Krusznik (the 20th century) was found without visible biological damages. Thus, the main biological damages were identified as: entomological, mycological, damaging algae and lichen (Fig.1).

A comparison of biological damages between some structures of the Bialystok Open-Air Museum in Poland and the National Museum of Folk Architecture and Life of Ukraine "Pyrogovo" presented in the Table 1. The research of the biodeterioration of wooden structures in the "Pyrogovo" was started in February and lasted until May 2015. As a result of the initial examination of wooden buildings of historical and ethnographic exhibits were created the previous database for biodeterioration monitoring and supervision of the technical condition in compliance with environmental safety (Kryvomaz and Perebnyos, 2015).

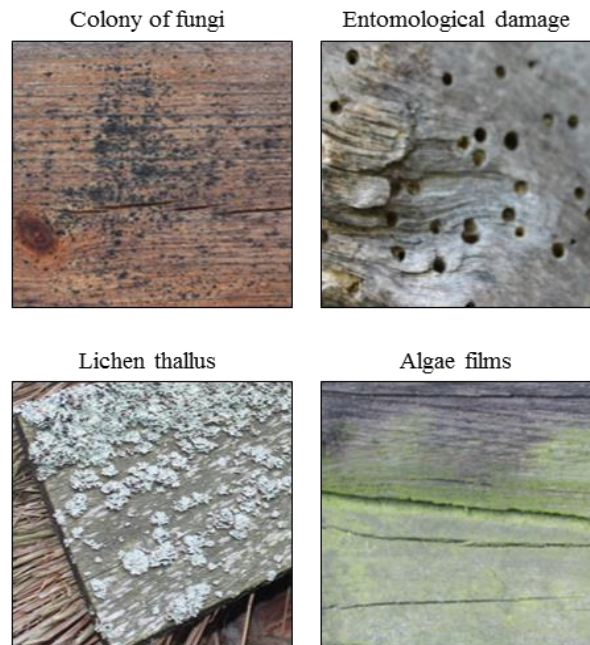


Fig. 1. Types of the biological damage of wooden structures of the Bialystok Open-Air Museum.

Tab.1. Comparison of biological damages between some structures of the Bialystok Open-Air Museum in Poland and the National Museum of Folk Architecture and Life of Ukraine "Pyrogovo".

Podlaskie region (Bialystok Open-Air Museum)						Polesie region (Open-Air Museum "Pyrogovo")					
Name of the building	Identified biodamages				Category of the technical state	Name of the building	Identified biodamages				Category of the technical state
	Entomological	Fungi	Algae films	Lichen thallus			Entomological	Fungi	Algae films	Lichen thallus	
Forester's house from Lipniak	+	-	+	-	2	Circumferential courtyard from Volyn region	+	+	-	+	4
Barn from Karczmisko	+	-	-	-	2	Barn from Chernihiv region	+	-	-	-	2
Granary from Karczmisko	+	-	-	-	2	Smithy from Volyn region	+	+	-	-	3
Stable from Karczmisko	+	-	-	-	2	Barn from Chernihiv region	+	+	-	-	2
Blackcap from Krusznik near Wigry	+	+	-	+	2	Cottage from Rivne region	+	+	+	-	3
Barn from Wdowin	+	-	-	-	2	Peeling mill from Chernihiv region	+	+	+	-	3
Livestock building from Krusznik	-	-	-	-	1	Barn from Chernihiv region	+	+	-	-	2
Cottage from Jacowlany	+	-	-	-	2	Cottage from Zhytomyr region	-	+	-	+	3
Granary from Lewki	+	+	-	-	2	Peeling mill from Chernihiv region	+	+	+	-	3
Cottage from Stara Grzybowszczyzna	+	+	-	-	2	Cottage from Chernihiv region	-	+	-	-	2
Barn from Nowy Ostrów near Krynki	+	+	-	+	2	Peeling mill from Chernihiv region	+	+	+	-	3
Manor from Bobra Wielka near Nowy Dwór	+	+	-	-	2	Cottage from Rivne region	+	+	-	-	2

The comparison showed a significant difference between technical states of buildings despite the fact that for this were used buildings with the appropriate technological purpose (residential, household or public buildings) and were approximately of the same age. In our opinion this is due to a small, but apparently significant difference, in the climate and the mode of operation of historical and architectural structures. The climate in Białystok is drier than in Kiev, which can affect the formation of biological damages (mycological, algological, etc.).

The damage of wooden structural elements of buildings such a biological agent as lichen was recorded in two buildings as in the Białystok museum and in the "Pyrogovo". Algae films were recorded on one building in the Białystok skansen and on four in the Open-Air Museum "Pyrogovo" (Fig. 2). It should be noted that such biological destructors as green algae, lichens and mosses have a feature to appear only on the outer parts of structures. The reason is that these organisms are capable to the photosynthesis, so the light is vital in their life as well as other outdoor environmental factors. Fungi and beetles are universal biodestructors that damage wooden structures both outside and inside the building.

Mycological damages were described in six buildings of the Białystok skansen as spotted colonies and in eleven buildings in the museum "Pyrogovo" as stains, wood discoloration and spotted colonies as well. Entomological damage was observed most among biodeteriorations of wooden constructions: eleven buildings in the Białystok Open-Air Museum and ten buildings in the "Pyrogovo" (Fig. 2).

The category of technical state is set by the classification features of wooden structures of buildings depending on the presence of certain defects and damages. The first category includes buildings without any defects and damages. Under the second category are subject buildings where notable distortions and other uneven deformation of wall structures; exists local and superficial lesions of wood rot (less than 5% of the surface or 10% of the sectional area of structures), there is little moisture and others. The third category includes a significant range of defects: lesion of wood by rot for 5-10% of the surface; moistening above the standard and design values; fouling

moss at the level of the basement; presence of signs of wood-beetles and others. The fourth category includes buildings with diagnostic signs of wood-destroying fungi; significant lesions of the wood by rot (more than 10% of the surface) and beetles, most of the wood has high moisture content and others (DSTU B V.1.2-№: 201X, 2012).

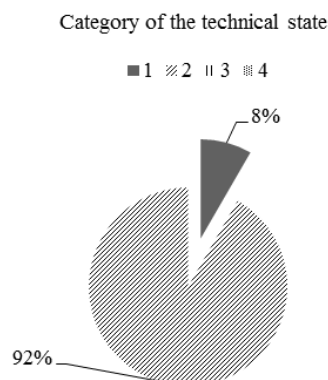


Fig. 3. Category of the technical state of buildings of the Białystok Open-Air Museum

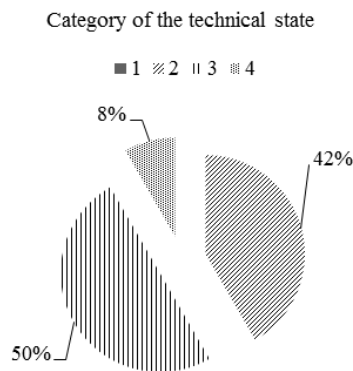


Fig. 4. Category of the technical state of buildings of the Open-Air Museum "Pyrogovo"

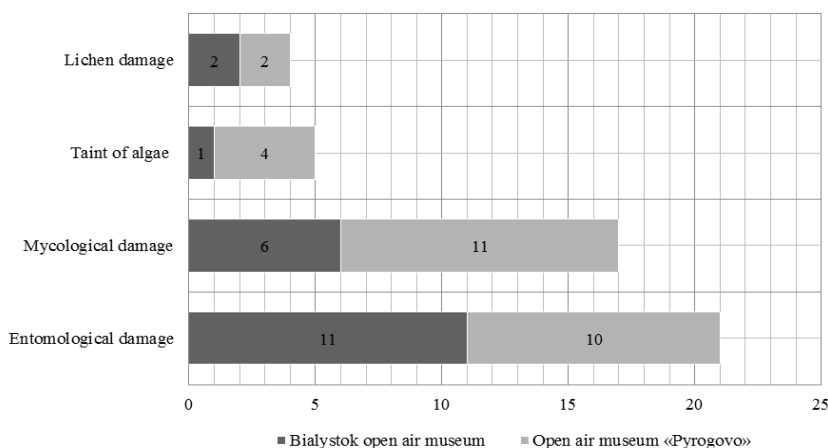


Fig. 2. Biological damages of buildings of the Białystok Open-Air Museum and the Open-Air Museum "Pyrogovo"

Taking the above into consideration, 92% of examined buildings were evaluated as the second category of the technical state, 8% refer to the first, and third and fourth category were absent in the Bialystok skansen (Fig. 3). In the comparison with the skansen "Pyrogovo": 42% of the presented buildings belong to the second category, 50% – the third, and 8% – the fourth (Fig. 4). It is important to note, that buildings in "Pyrogovo" were removed from their original places from whole Ukraine to the museum territory. This acts and changing of their native environment made the significant effect on the state of wooden constructions.

5. Conclusion

1. The preliminary survey of biodeterioration in the Bialystok Open-Air Museum showed that wooden buildings are in good condition and 92% of historical and architectural constructions were estimated to the second category of the technical state.
2. The inessential biological damages of studied wooden constructions were caused by entomological, mycological, algological and lichenological agents.
3. Entomological damage prevails among the biodeterioration of the wooden elements of historical and architectural structures both in the Bialystok Open-Air Museum and the Open-Air Museum "Pyrogovo".
4. The comparison of both skansens showed that the condition difference of wooden constructions depends on the initial state of buildings, the process of operation and the environmental factors.
5. The probability grade of fungi germination could predict the reaction of fungi to certain climatic data to improve the conditions of historical and architectural structures.

Literature

- Bashkatov Yu. Yu., Terpylovsky R. V. (2011). To the history of skansens in Europe. *Archaeology and ancient history of Ukraine: IA HAHY*, Vol. 5, 7-16.
- Danyliuk A. (2006). Ukrainian Skansens. History of Emergence, Expositions, Developmental Problems. Navch. knyha-Bohdan, Ternopil, Dogdan, Ukraine.
- Gawel A. (2012). Białostockie Muzeum Wsi. Przewodnik. *Muzeum Podlaskie w Białymstoku*, Białystok.
- Knyazeva V.P. (2005). Ekologiya. Osnovy restavratsii. Ucheb. posobie. Arkhitektura-S, Moskwa, Rossiya.
- Koval E. Z., Mytkivska T. I. (2011). Mikolohichne obstezhennia muzeinykh pamiatok. Natsionalnyi naukovodoslidnyi restavratsiynyi tsentr Ukrainy, Kyiv, Ukraine.
- Kryvomaz T. I., Perebynos A.R. (2015). Preliminary evaluation of fungal destruction of wooden construction in NMFALU "Pyrohiv" / T.I. Kryvomaz, A.R. Perebynos // Ecological security and nature use, 2 (18), 66-75.
- Perebynos A. (2015). Algorithm of microdestruction monitoring of historical and architectural wooden structures. *Proceedings of the 1st All-Ukrainian scientific conference of young scientists, postgraduate students and students "Bud-Master-Class"*. Kyiv: KNUCA, 70-71.
- Rentzhog S. (2007). Open-air museums: The history and future of a visionary idea. *Carlsson Jamtli Förlag*, Stockholm and Östersund, Sweden.
- Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Obstezhennia i pasportyzatsiia tekhnichnoho stanu budivel ta inzhenernykh sporud (proekt, druh a redaktsiia) [System reliability and safety of construction projects. Inspection and certification of technical condition of buildings and engineering structures (draft, second edition)]. (2012). DSTU B V.1.2-№: 201X. Kyiv: Minregion Ukraine [in Ukrainian].
- Varchenko E. A. (2014). Estimation of biodegradation and bio-corrosion of materials in natural environments. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, Vol. 10, Issue 104, 1966-1983.

RESEARCH OF MAIN ANALYSIS PARAMETERS OF INFILTRATION AREAS CONNECTING TO THE STORM DRAINAGE SYSTEM

Olha SHEVCHUK*, Oleksandr TKACHUK*

Department of Urban Planning and Development, National University of Water Management and Environmental Engineering, 11 Soborna str., 33028 Rivne, Ukraine

Abstract: Infiltration areas with permeable pavements are one of the most effective modern methods of stormwater management on urban areas that permit accumulation of rainfall directly at place of precipitation. The paper justifies the expediency of inclusion of infiltration areas in the storm drainage system to ensure the effective stormwater management on urban areas. Thus, the aim of this paper is to calculate infiltration areas' basic parameters following the experimental and theoretical studies undertaken by authors. Based on these studies, a mathematical model of filling and emptying of base layer of infiltration areas by connecting them to the rain drainage systems is determined. As a result the formulae of calculation of the stormwater volume that detained on the infiltration areas, and the drainage discharges that came in the rain drainage system are received and verified. Moreover, obtained results permit to realize stormwater management on urban areas that depend on parameters of infiltration areas and pipe capacity of drainage system.

Key words: stormwater management, infiltration areas, permeable pavements, runoff volume, drainage discharge.

1. Introduction

In recent years, in the cities all over the world, urban areas' flooding resulted by rainfall is increasingly observed. In Ukraine, the flooded areas as a result of rainfall expand on the territory of more than 500 towns and cities and cover the area of about 200 thousand hectares (11% of the total area of these settlements). The potential flooded areas can cover more than 150 thousand hectares of built-up territories. In more than 20 major cities flooded areas exceed 1000 hectares (Ihnatenko and Zuzanska, 2012).

The main problems of stormwater disposal from urban areas in Ukraine are:

- increasing the percent of areas with impervious pavement;
- lack and inadequate technical condition and treatment of the rain drainage system;
- lack of government program of stormwater disposal;
- irrational approach to the issue of stormwater disposal, that focused on their fast interception and discharging into sewer system.

The works of many scientists are dedicated to the estimation issue of formation and regulation of stormwater runoff on urban areas (Alekseev and Kurhanov, 2000; Ferguson, 2005; Tkachuk and Zhuk, 2012). These scientists have made a significant contribution to the

estimation of the runoff discharges calculation by limiting intensity method (Alekseev and Kurhanov, 2000), and research of the some methods and operation processes of facilities in stormwater regulation (Ferguson, 2005; Tkachuk and Zhuk, 2012). However, the issues of optimization of rain drainage system through an integrated approach to the stormwater management (interception and disposal) and purification are still unresolved (Tkachuk and Shevchuk, 2015a).

In developed countries of Europe and the North America the stormwater management of runoff in urban areas has taken a 'green' approach due to the emergence of urban flooding, which collect, store, treat, redistribute and/or recycle water (Astebol et al., 2004). Examples of these techniques are swales, filter strips, wetlands, ponds and infiltration areas. These methods reduce the maximum load on the existent drainage system, and delay pollution, prevent the flooding of areas. One of these methods is a construction of infiltration areas with permeable pavements for temporary interception and followed by stormwater infiltration in the drainage system pipes. The using of the modern permeable pavements for such urban areas as parking lots, various driveways, and lawns can significantly increase the areas, and the volume of temporarily intercepted rainwater can be used with permeable pavements (Scholz and Grabowiecki, 2007).

The use of infiltration areas with the rain drainage system allows at the design stage reducing the diameter

* Corresponding author, e-mail: shevchuk.olga.v@gmail.com

* Corresponding author, e-mail: o.a.tkachuk@nuwm.edu.ua

of the new pipe and decreasing the networks value. Other infiltration areas' advantages are environmental compatibility and increasing the attractiveness of territories, etc. (Dierkes et al., 2002; Astebol et al., 2004).

Measures of stormwater management should set the priority of permeable pavements over the impervious pavements, only if the certain conditions do not limit it. Consequently the entire green tracks of Germany, which according to the survey account for 380 km single track of grass store more than 560 000 m³ precipitation water with considerable microclimatic effects. Potentially at least 1 150 km of Germany's tram tracks are greenable which equals an area of about 287.5 ha. If this area was greened, annual water retention of 1.55 million m³ would be possible (Schreiter and Kappis, 2013). In 2011 United States Environmental Protection Agency (EPA, 2011) accepted the Stormwater Management Program and 47.3% of its 479 state projects allowed for the using of infiltration areas with permeable pavements. The most of them are modernization of existent pavements, such as parking lots, pavements, trails, etc.

In comparison to traditional drainage systems, storm water retention and infiltration is a sustainable and cost effective process, which is suitable for urban areas (Andersen et al., 1999; Dierkes et al., 2002). Also they provide more effective peak flow reductions (up to 42%) and longer discharging times. There is also a significant reduction of evaporation and surface water splashing (Booth and Leavitt, 1999; Pagotto et al., 2000; Abbot and Comino-Mateos, 2003; Scholz, 2006). Moreover, infiltration areas with permeable pavement have many potential benefits such as reduction of runoff, recharging of groundwater, saving water by recycling and prevention of pollution (Pratt et al., 1999; Pagotto et al., 2000; Abbot and Comino-Mateos, 2003). This corresponds to the requirements of Water Frame Directive if the status of groundwater quality is not disturbed (Directive 2000/60/EC).

Many methods of calculation of infiltration areas are very simplified and do not introduced to many important factors (AMEC Earth and Environmental, 2001; DWA

German Association for Water, 2005; CDT, 2013; DDE, 2013). In particular the time of filling (2 hours) (DDE, 2013) or emptying (72 hours) (CDT, 2013) of the porous structure of the area is therefore likely to be empirical and not corresponded the real conditions. Some methods don't introduce to fraction of impervious pavement (AMEC Earth and Environmental, 2001) and calculation of parameters of drainage system (DWA German Association for Water, 2005). Very often the calculation recommendations of the runoff volume intercepted by pavements are given in not full extent or are completely unavailable. This disputes the effectiveness of permeable pavements use in the stormwater management.

Thus, the aim of this paper is to calculate infiltration areas' basic parameters (the volume of intercepted stormwater; the time of filling and emptying of the porous structure of the area; the admeasurement of the reducing of maximum stormwater discharge that includes the amount of water in the drainage system pipelines) following the experimental and theoretical studies undertaken by authors. Therefore, the experimental part of the presented research includes testing of a fragment of infiltration area on the surface of which was imitated artificial "rainfall" with different intensity, estimates drainage water discharge. The results of experimental and theoretical studies were compared.

2. Materials and methods

2.1. Experimental studies

We conducted laboratory tests on the laboratory rig, which is actually a fragment of infiltration area (Fig. 1), which can be arranged on any flat area, for example, parking lot. Rainfall flows to the infiltration area in the form of rain drops and an additional input from surrounding areas. Along perimeter or its larger sides there can be arranged tray that ensuring steady distribution of rainwater throughout the area. A pavement surface composed of structural units with void areas that are filled with grass turf.

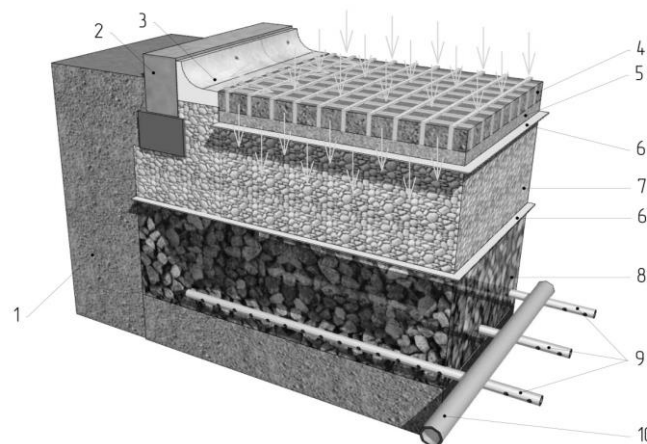


Fig. 1. Model of infiltration area: 1 – underlying soil; 2 – kerb; 3 – opened tray; 4 – plastic paving grids; 5 – bedding layer; 6 – geotextile; 7 – structural base layer; 8 – storage base layer; 9 – drainage pipes; 10 – manifold

For realization of experiment laboratory rig was designed and constructed (Fig. 2). The experimental model with using plastic paving grids was placed on a container which size was 600×400×500 mm. The type of base course was accepted in accordance with the recommendations (AMEC Earth and Environmental, 2001; DWA German Association for Water, 2005; CDT, 2013; DDE, 2013) and it had such construction as modular paving grid with void areas that were filled grass turf – thickness 50 mm; bedding layer of sand – thickness 30 mm; geotextile layer; structural base layer of gravel – thickness 200 mm; geotextile layer; storage base layer of gravel – thickness 150 mm; drainage layer of gravel and pipe separated by micromesh – thickness 20 mm.

The structure of the soil substrate of void areas consisted of 80% of sifted soil (sieve size 5 mm) and 20% of washed sand, 0.1-2 mm in diameter. The structure of the bedding layer consisted of washed sand, 0.1-2 mm in diameter. The structure of the structural base layer consisted of gravel, 2-40 mm in diameter. The storage base layer consisted of gravel, 10-40 mm in diameter. Non-woven, needle-punched geotextile was used with a fibre area weight of 200 g/m². Drainage layer consisted of gravel, 20-40 mm in diameter. Before the beginning of experiment drainage layer was filled with water and the waterline on piezometer tube stood on the datum point. Therefore, during the experiment, the volume of water in this layer was not introduced to the calculations.

During the experiment rainfall were imitated on the surface with intensity $i = 2.3; 4.8$ and 9.0 mm/min, and this intensity corresponded discharges $q = 550, 1150$ and 2160 ml/min (Fig. 3).

2.2. Theoretical studies

The water impoundment process of infiltration area on basis of the constant time rainfall intensity $i_r = \text{const}$ and the unavailability of the subgrade bottom and side

walls infiltration is represented through drainage water discharge in time t , in min, when the base is impounded by the formula (1):

$$Q_{dr} = k_{dim} \cdot i_r \cdot F_t \cdot (1 - e^{-\varepsilon \cdot t}) \quad (1)$$

where: k_{dim} is a dimension coefficient, i_r is a rainfall intensity, ($i_r \approx \text{const}$), in mm/min; F_t is a total runoff area, in m²; ε is a non-dimensional parameter that depends on the gravel base course characteristics and is estimated by the formula (2) (Tkachuk and Shevchuk, 2015):

$$\varepsilon = \frac{k_e \cdot K_f}{p \cdot H} \quad (2)$$

where: k_e is an equivalence coefficient characterizing drainage conditions through gravel base course of infiltration area, K_f is a filtration coefficient of gravel base course, in mm/min; p is a porosity of gravel base course, H is a total height of gravel base course, in mm.

The equivalence coefficients k_e depend on the conditions of water drainage and disposal from infiltration areas. Their values are regulated users over the range $k_e = 0..k_{e,max}$. Thus, $k_e = 0$ when there isn't water diversion from infiltration area, and $k_e = 0..k_{e,max}$ when there is the regulation of water discharge on the outlet pipe to the drainage system structures. The value $k_{e,max} = 0.3$ was determined experimentally during tests on laboratory facility in conditions of gravity filtration (Tkachuk and Shevchuk, 2015b).

Drainage water discharges (after the end of the rainfall) are calculated by the formula:

$$Q_{dr} = Q_0(1 - b \cdot (t_r - t_0)) \quad (3)$$

where: Q_0 is an initial stormwater discharge in time t_r (end of the rainfall), in ml/min; t_r / t_0 is a time of the rainfall end/beginning, in min; b is a parametric variable that takes into account the emptying conditions.

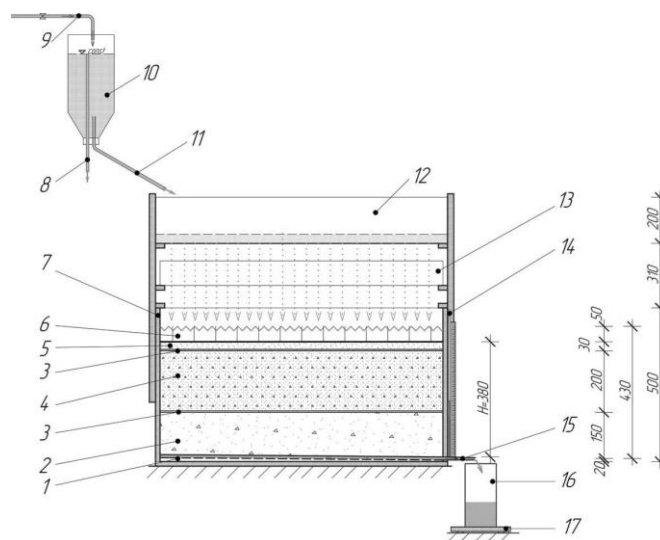


Fig. 2. Scheme of experimental rig: 1 – drainage layer; 2 – storage base layer; 3 – geotextile; 4 – structural base layer; 5 – bedding layer; 6 – plastic paving grid; 7 – supporting structure; 8 – spillage tube; 9 – water feed pipe; 10 – reservoirs for water; 11 – water feed pipe on rig; 12 – tank for rainfall imitation; 13 – removable tray; 14 – piezometer tube; 15 – drainage pipe; 16 – measuring jug; 17 – scales Elenberg KS130.

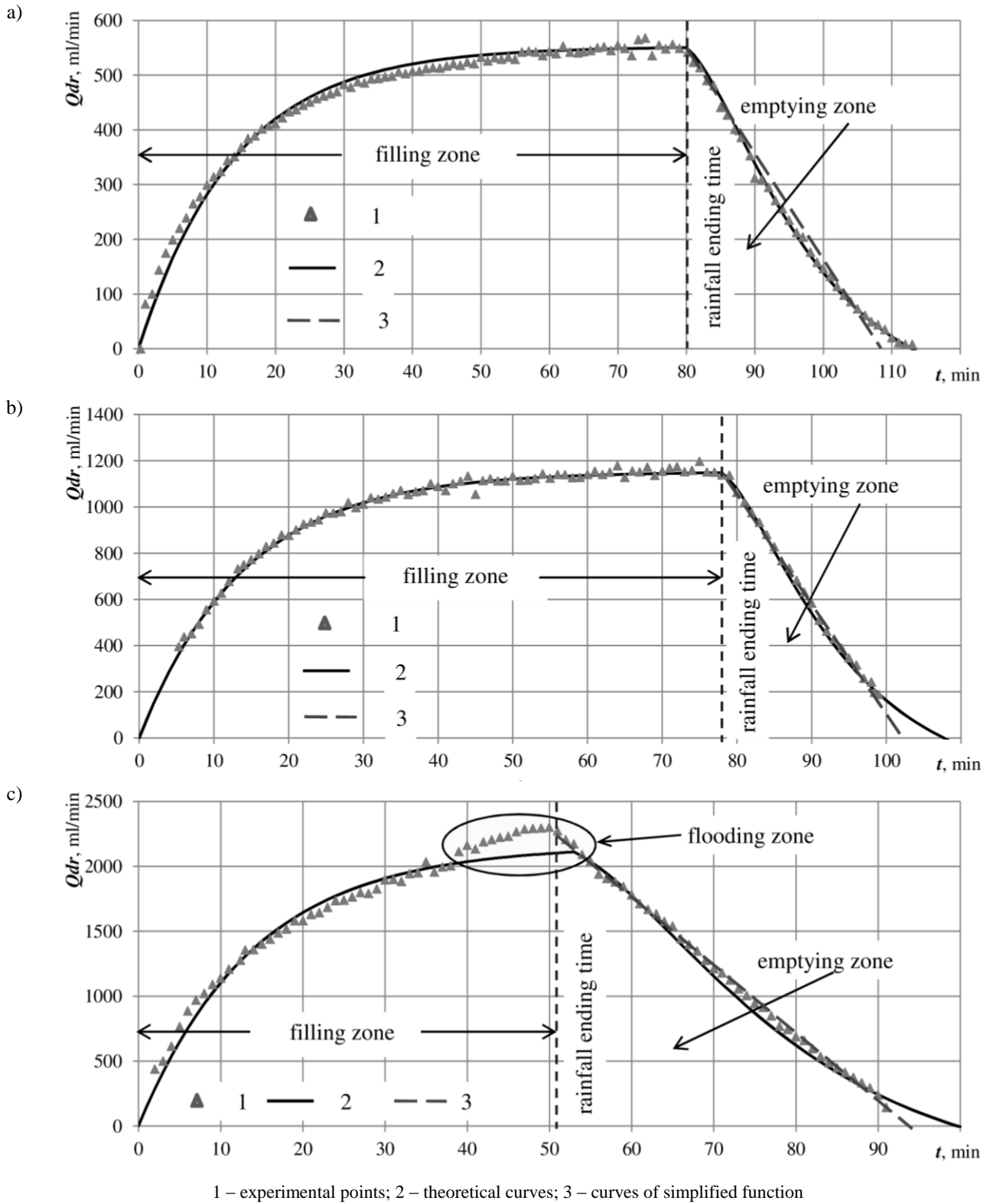


Fig. 3. The graph of time variation of drainage discharges on experimental rig for runoff intensity, where: a) $i = 2.3$ mm/min; b) $i = 4.8$ mm/min; c) $i = 9.0$ mm/min.

3. Results and discussion

Comparison of experimental data of stormwater discharge time changes for different admeasurement of the water intake, and theoretical curves built by formulae (1) and (3), estimated by t-test (Montgomery, 2001) and showed their complete concurrency (Fig. 3). Thus, the analytical functions (1) and (3) should be seen as a mathematical model of regulation stormwater discharge on the infiltration areas. The study results made it possible to assess the rainwater volume that can be intercepted on infiltration areas. Whereas, by its functional application infiltration areas are facilities for regulation of the rainwater discharges in front of the rain drainage systems, the water volume of accumulating space and drainage discharge can be determined by the formulae (4) and (5):

$$W_{dr} = k_{dim} \cdot \psi_{mid} \cdot i_r \cdot F_t \cdot t_0 \cdot e^{-0.43 \cdot \varepsilon \cdot t_r} \cdot (1 + \varepsilon \cdot t_r)^{-\Delta t_r} \quad (4)$$

$$Q_{dr} = k_{dim} \cdot \psi_{mid} \cdot i_r \cdot F_{run} \cdot \left(1 - e^{-\varepsilon \cdot t_r \cdot (1 + e^{-\varepsilon \cdot t_r} \cdot \Delta t_r)} - \frac{\varepsilon \cdot t_r}{2} \cdot e^{-2 \cdot \varepsilon \cdot t_r} \cdot \Delta t_r \right) \quad (5)$$

where Δt_r is a relative duration of infiltration area interception.

Formulae (4) and (5) can be transformed in following equations (6) and (7):

$$W_{dr} = k_{dim} \cdot \psi_{mid} \cdot F_t \cdot A \cdot k_h \quad (6)$$

$$Q_{dr} = k_{dim} \cdot \psi_{mid} \cdot F_t \cdot A \cdot k_q \quad (7)$$

where: k_h i k_q are variation coefficients of accumulated rainfall layer height and drainage discharge based on the estimated rainfall duration and calculated by formulae of a mathematical model of infiltration areas (Tkachuk and Shevchuk, 2015a):

$$k_h = t_r^{1-n} \cdot e^{-0.43 \cdot \varepsilon \cdot t_r} \cdot (1 + \varepsilon \cdot t_r)^{\frac{\Delta t_r}{t_r}} \quad (8)$$

$$k_q = t_r^{-n} \cdot \left(1 - e^{-\varepsilon \cdot t_r \cdot \left(1 + e^{-\varepsilon \cdot t_r} \cdot \frac{\Delta t_r}{t_r} \right)} - \frac{\varepsilon \cdot t_r}{2} \cdot e^{-2 \cdot \varepsilon \cdot t_r} \cdot \frac{\Delta t_r}{t_r} \right) \quad (9)$$

or calculated by simplified formulae (10) and (11):

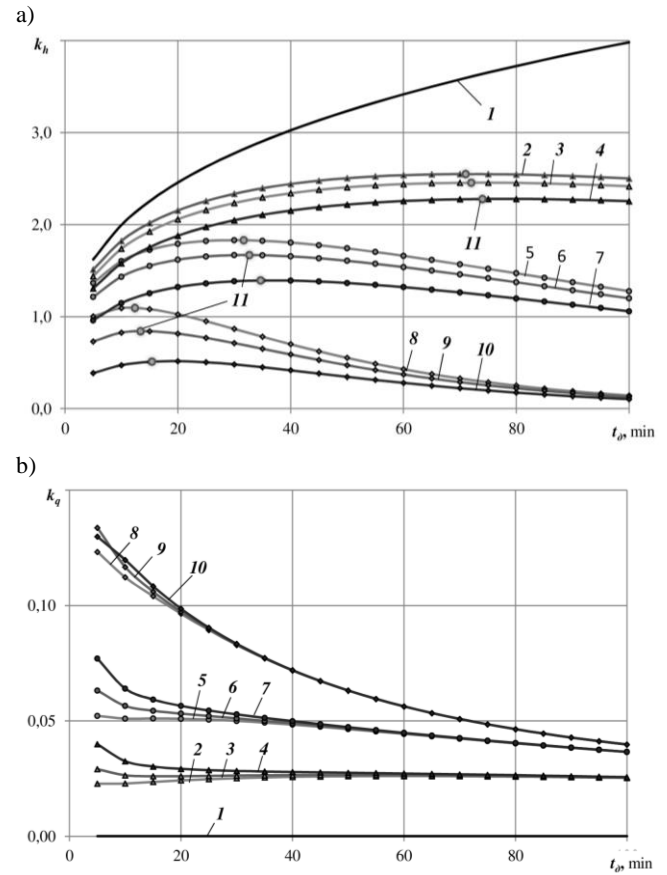
$$k_h = t_r^{1-n} \cdot e^{-\left(0.45 + 0.65 \cdot \frac{\Delta t_r}{t_r} \right) \cdot (\varepsilon \cdot t_r)^{0.9}} \quad (10)$$

$$k_q = t_r^{-n} \cdot \left(1 - e^{-1.1 \cdot (\varepsilon \cdot t_r)^{0.9}} \right) \quad (11)$$

where Δt_r is a duration of continuous runoff formation on infiltration area or a concentration time of runoff from the most remote points of the territory and can be determined as the estimated duration of the runoff flow on surface and trays, in min.

According to formulae (8) and (9) Figure 4 shows an example of dependency graph $k_h = f(t_r)$ and $k_q = f(t_r)$ for

$\varepsilon = 0, 0.01, 0.025$ and 0.075 and $\Delta t_r = 5, 10$ and 20 min with the value of the parameter $n = 0.7$ in the range of real data $0.6..0.75$ (DBN, 2013).



1 – calculation data of (8) and (9) for $\varepsilon = 0$; 2, 3 and 4 – the same for $\varepsilon = 0.01$ and $\Delta t_r = 5, 10$ and 20 min; 5, 6 and 7 – the same for $\varepsilon = 0.025$; 8, 9 and 10 – the same for $\varepsilon = 0.075$; 11 – points of maximum values of k_h parameters calculated by (8)

Fig. 4. The graph of equation: a) $k_h = f(t_r)$, b) $k_q = f(t_r)$.

The data of Figure 4a show that the value of the parameter k_h has the maximum. This value determines the estimated value of rainwater volume W_{dr} that should be intercepted on infiltration site. A mathematical analysis of the function (10) was conducted to find the maximum parameter k_h . It showed following empirical equation to determine the estimated duration of rain $t_{r,est}$ which corresponded to maximum k_h :

$$t_{r,est} = 3.7 \cdot \frac{1-n}{\varepsilon^{0.9}} + 0.2 \cdot \Delta t_r \quad (12)$$

When the rainwater volume W_{dr} , in m^3 , which should be intercepted on infiltration area, is known the total base layer height, in m, will be estimated as:

$$H = \frac{W_{dr}}{F_{in} \cdot \rho} \quad (13)$$

where F_{in} is an area of infiltration site, in m^2 , which is calculated as:

$$F_{in} = \psi_{mid} \cdot k_{in} \cdot F_t, \quad (14)$$

where k_{in} is a correlation coefficient of rainfall intensity to the drainage intensity on the infiltration site, $k_{in} \leq 0.1$.

The diameter and slope of pipes are calculated according to the values drainage discharges Q_{dr} drainage system (DBN, 2013).

The dimensions of parameters of received formulae are represented in Table 1.

Table 1. Dimensions of main parameters of infiltration areas.

№	Parameter	Value		Reference
		min	max	
1	K_f (mm/min)	20	100	(AMEC Earth and Environmental, 2001; Ferguson, 2005); personal experimental studies
2	p	20	40	(AMEC Earth and Environmental, 2001; Ferguson, 2005)
3	H (m)	0,3	1,3	(AMEC Earth and Environmental, 2001); personal experimental studies
4	k_e	0	0,3	personal experimental studies
5	F_{in}/F_t	1:1	1:3 1:10	(AMEC Earth and Environmental, 2001); personal experimental studies
6	i_r (mm/min)	0	10	personal experimental studies
7	ψ_{mid}	0,8	1,0	(DBN, 2013); personal experimental studies

4. Summary of the results

The problems of runoff disposal from urban areas become significant. Change of approach toward stormwater management is an actual priority. One of these methods is using of infiltration areas with permeable pavements, that reduce runoff volume directly at place of precipitation and they are the most conductive maintenance of water balance.

But many methods of calculation of infiltration areas do not introduced to many important factors and are very simplified. Very often the calculation recommendations of the runoff volume intercepted by pavements are given in not full extent or are completely unavailable. Some methods do not introduce to calculation of parameters of drainage system with connection of infiltration areas.

Based on experimental and theoretical studies, a mathematical model of filling and emptying of stormwater infiltration areas' aggregate by connecting them to the rain drainage systems is determined. This mathematical model of stormwater discharge regulation on infiltration areas is represented by obtained analytical functions (1) and (3).

The functions (6)-(12) determine dependence between

the rainwater volumes intercepted on the infiltration area and drainage discharges that flow from them in the rain drainage system. This allowed to determine the size and operating parameters of rainwater regulation facilities on urban areas and estimate dependence of infiltration areas parameters from the method of stormwater disposal and drainage capacity of existing facilities of drainage system. Input them to the rain drainage system allows to provide effective stormwater management on urban areas, accumulate rainfall directly at place of precipitation, reduce the maximum water discharge that determine pipe diameters and sizes of facilities of rain drainage system.

Literature

- Abbot C., Comino-Mateos L. (2003). In-situ hydraulic performance of a permeable pavement sustainable urban drainage system. *Water and Environmental Journal*, Vol. 17, No. 3, 187-190.
- Alekseev M., Kurhanov A. (2000) Orhanyzatsiya otvedeniya poverkhnostnoho (dozhdevoho y taloho) stoka s urbanyzyrovannykh terrytoryi [Organization of runoff (rainfall and snowmelt) disposal from urban areas]. Moscow: Publishing ASB; SPb.:SPbHASU (in Russian).
- AMEC Earth and Environmental (2001). CWP Georgia Stormwater Management Manual. Technical Handbook. *AMEC Earth and Environmental, Center for Watershed Protection*, Atlanta.
- Andersen C., Foster I., Pratt C. (1999). The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment. *Hydrological Processes*, Vol. 13, No. 4, 597-609.
- Astebol S., Hvitved-Jacobsen T., Simonsena A. (2004). Sustainable storm water management at Fornebu - from an airport to an industrial and residential area of the City of Oslo, Norway. *Science of the Total Environment*, 2004; 334-335(Special Issue): 239-49.
- Booth D., Leavitt J. (1999). Field evaluation of permeable pavement systems for improved storm water management. *American Planning Association Journal*, Vol. 65, No. 3, 314-325.
- CDT (2013). Pervious Pavement Design Guidance. *California Department of Transportation, Division of Design Office of Storm Water Management*, Sacramento, California.
- DBN V.2.5-75 (2013). Kanalizatsiia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia. [Sewerage. External networks and facilities. The main principles of the design]. *Minrehionbud Ukrainy*, Kyiv 2013 (in Ukrainian).
- DDE (2013). Draft District of Columbia Stormwater Management Guidebook. *District Department of the Environment*, Washington D.C..
- Dierkes C., Gobel P., Benze W., Wells J. (2002). Next generation water sensitive stormwater management techniques. In: Melbourne Water, editor. *Proceedings of the 2nd National Conference on Water Sensitive Urban Design*, 2-4 September 2000, Brisbane, Australia, 2002.
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy: OJL 327, 22 December 2000.
- DWA German Association for Water (2005). DWA A 138 Planning, Construction and Operation of Facilities for the

- Percolation of Precipitation Water. *DWA German Association for Water*, Hennem. 2005.
- Environmental Protection Agency (2011). Green Infrastructure: <http://water.epa.gov/infrastructure/greeninfrastructure/index.cfm>, *United States Environmental Protection Agency*.
- Ihnatenko O., Zuzanska O. (2012). Derzhavna polityka shchodo system poverkhnevoho vodovidvedennia v Ukraini [State policy of runoff drainage system in Ukraine], Problems of water supply, wastewater removal and hydraulics. *Scientific and technical collection*, Kyiv, KNUBA, Vol 19, 2012, 7-12 (in Ukrainian).
- Ferguson B. (2005). Porous Pavement: Integrative studies in water management and land development. *Boca Raton: CRC Press*.
- Montgomery D. (2001). Design and Analysis of Experiments. 5th Edition. *John Wiley and Sons*.
- Pagotto C., Legret M., Le Cloirec P. (2000). Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement. *Water Research*, Vol. 34, No. 18, 4446-4454.
- Pratt C., Newman A., Bond P. (1999). Mineral oil biodegradation within a permeable pavement: long-term observations. *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 2, 109-130.
- Scholz M. (2006). Wetland systems to control urban runoff. *Elsevier*, Amsterdam.
- Scholz M., Grabowiecki P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, Vol. 42, 3830-3836.
- Schreiter H., Kappis C. (2013). Effect and Function of Green Tracks. Network Management. *IASP*, Berlin.
- Tkachuk O., Shevchuk O. (2015a). Model zatrymannia doshchovykh vod na infiltratsiinykh maidanchykakh [The model of stormwater detention on the infiltration areas] *Bulletin NUWMNRU*, Vol. 4, 485-497 (in Ukrainian).
- Tkachuk O., Shevchuk O. (2015b). Doslidzhennia roboty infiltratsiinykh maidanchykyv dlia system doshchovoho vodovidvedennia [Researching of the infiltration areas function for the drainage system] *Bulletin NUWMNRU*, Vol. 3, 100-105 (in Ukrainian).
- Tkachuk S., Zhuk V. (2012). Rehuliuвання doshchovoho stoku v systemakh vodovidvedennia [Stormwater regulation on drainage systems] Lviv: *Publishing Lviv Polytechnic* (in Ukrainian).