

JCEE

Czasopismo
Inżynierii Lądowej,
Środowiska
i Architektury

Journal of Civil
Engineering,
Environment
and Architecture

Kwartalnik
tom XXXIV
zeszyt 64 (nr 2/II/2017)
kwiecień-czerwiec

(e-ISSN 2300-8903)

Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury jest kontynuacją
Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej - Budownictwo i Inżynieria Środowiska.

Wydano za zgodą Rektora

Redaktor naczelny
Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej
prof. dr hab. Grzegorz OSTASZ

Rada Naukowa

prof. Hasan Arman (Zjednoczone Emiraty Arabskie), prof. Zinoviy Blikharskyy (Ukraina)
prof. Antonio João Carvalho de Albuquerque (Portugalia), prof. Marina Ciuna (Włochy)
prof. Volodymyr V. Cherniuk (Ukraina), prof. Maurizio d'Amato (Włochy)
prof. Endre Domokos (Węgry), prof. Mohamed Eid (Francja), prof. Maria Elektorowicz (Kanada),
prof. Haritha Malladi (USA), prof. Samuel Hudson (USA), prof. Dušan Katunsky (Słowacja)
prof. Krzysztof Knapik (Polska), prof. Ryszard L. Kowalczyk (Australia)
prof. Jozef Kriš (Słowacja), prof. Vincent Kvočák (Słowacja), prof. Stanisław Kuś (Polska)
prof. Mladen Radujkovic (Chorwacja), prof. Czesława Rosik-Dulewska (Polska)
prof. Francesca Salvo (Włochy), prof. João Antonio Saraiva Pires da Fonseca (Portugalia)
prof. Marco Simonotti (Włochy), prof. Nadežda Številová (Słowacja),
prof. Janusz A. Tomaszek (Polska), prof. David Valis (Czechy)
prof. António Avelino Batista Vieira (Portugalia), prof. Oksana Vovk (Ukraina)
prof. Tomasz Winnicki (Polska), prof. Jerzy Ziółko (Polska)

Komitet Redakcyjny

(afiliacja: Polska)

redaktor naczelny

dr hab. inż. Piotr KOSZELNIK, prof. PRz

redaktorzy tematyczni (naukowi)

dr hab. inż. Bartosz MILLER, prof. dr hab. inż. Janusz RAK

redaktor statystyczny

dr hab. inż. Szczepan WOLIŃSKI, prof. PRz

sekretarz redakcji

dr inż. Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK

członkowie

dr inż. Renata GRUCA-ROKOSZ, dr inż. arch. Anna SIKORA, dr inż. Michał JUREK,
dr hab. inż. Lucjan ŚLĘCZKA, prof. PRz, mgr inż. Artur SZALACHA

Przygotowanie matryc

Artur SZALACHA

p-ISSN 2300-5130

e-ISSN 2300-8903

Wersja drukowana Kwartalnika jest wersją pierwotną.

Redakcja czasopisma: Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska
i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/ (e-mail: kpjet@prz.edu.pl)

Wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 12,
35-959 Rzeszów, www.oficyna.prz.edu.pl (e-mail: oficyna@prz.edu.pl)

Informacje dodatkowe i stopka – str. 299

SPIS TREŚCI

Dominika ZIAJA, Bartosz MILLER: Analiza wpływu temperatury na zmianę parametrów dynamicznych stalowej ramy portalowej	5
Anna WIEPRZKOWICZ, Dariusz HEIM: Współczynnik tłumienia amplitudy wahań temperatury izolacji termicznej modyfikowanej materiałem fazowo zmiennym	17
Mateusz SZARATA, Piotr NAZARKO: Analiza możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych do kalibracji modeli mikrosymulacyjnych	25
Ryszard OKOŃSKI, Rafał PASELA: Wpływ zastosowania w chłodnictwie fluorowanych gazów cieplarnianych na globalne ocieplenie klimatu	37
Marcin KACZMARZYK: Wpływ współczynnika kształtu A/V na wielkość strat ciepła w budynku w świetle rosnących wymogów dotyczących izolacyjności termicznej przegród budowlanych	45
Sabina KSIĄŻEK, Małgorzata KIDA, Piotr KOSZELNIK: Możliwości katalitycznego zastosowania materiałów odpadowych	55
Roman CIEŚLIŃSKI, Michał PRZYBYLSKI: Ocena hydrochemiczna kłęski ekologicznej na jeziorze Druzno i rzece Wąskiej w 2014 roku	63
Adam RYBKA, Marta JAŃCZUK, Klaudia JAREMA-KUŚNIERZ, Jaime ROSET CALZADA: Kształtowanie wysokich obiektów architektury w tkance miejskiej Rzeszowa	83
Marta RUSNAK: Wpływ aspektów funkcjonalnych, ekonomicznych i psychologicznych na okno muzealne w zabytkowym budynku przemysłowym	103
Marta OLESZKO, Vyacheslav PISAREV: Analiza systemu wentylacji z recyrkulacją powietrza oraz krzyżowym wymiennikiem ciepła w okresie zimowym	111
Anna BAZAN-KRZYWOSZAŃSKA, Maria MRÓWCZYŃSKA, Marta SKIBA: A Policy of Development of Post-Mining Land on the Example of Zielona Góra	121

Andżelika PIETRZYK, Dorota PAPCIAK: Wpływ technologii oczyszczania wody na proces kształtowania biofilmu na wybranych materiałach instalacyjnych	131
Klara KANTOROWICZ: Architektura kolegiów jezuickich we Włoszech i w Rzeczypospolitej do połowy XVII wieku – poszukiwanie wzorów na wybranych przykładach.....	145
Marek GOSZTYŁA, Stanisław LEŚ, Krystian SIKORSKI: Preliminaria nad stanem badań praktyki konserwatorskiej w Rzeszowie.....	161
Zbigniew MOTYKA: Systems for Spatial and Physico-Chemical Parameters Mapping of Anthropogenic Landscape Forms and Plants Formations in Mining Areas with the Use of Photogrammetry and Remote Laser Sensing from Low Height.....	173
Barbara TURON, Dominika ZIAJA, Bartosz MILLER: Wykrywanie uszkodzeń węzłów ramy stalowej z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu	185
Dawid MROZEK, Magdalena MROZEK, Jan FEDOROWICZ: Analysis of an Effectiveness of Expansion Joints in the Multi-Family Building Loaded by Mining Activities	199
Martyna RABENDA, Marcin KAMIŃSKI: Dual Probabilistic Analysis of the Transient Heat Transfer by the Stochastic Finite Element Method with Optimized Polynomial Basis.....	211
Jadwiga BIZON-GÓRECKA, Michał MATUSZCZAK: Analiza technologiczności rozwiązań projektowych obiektów budowlanych o konstrukcji stalowej.....	227
Adam RYBKA, Michał KRUPA: Konstrukcja i architektura hal sportowych na Podhalu (na wybranych przykładach).....	235
Halina GARBALIŃSKA, Magdalena BOCHENEK: Ocena możliwości wyznaczania izoterm sorpcji dynamiczną metodą DVS – na przykładzie betonu komórkowego klasy 700.....	247
Henryk WACHTA, Krzysztof BARAN, Marcin LEŚKO: Możliwości wykorzystania w pracach rewitalizacyjnych zaawansowanych aplikacji graficznych	255
Agnieszka WIATER, Tomasz SIWOWSKI: Nośność na ścinanie zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi FRP w świetle wybranych procedur obliczeniowych	267

Dominika ZIAJA¹
Bartosz MILLER²

ANALIZA WPLYWU TEMPERATURY NA ZMIANĘ PARAMETRÓW DYNAMICZNYCH STALOWEJ RAMY PORTALOWEJ

Jedną z nieniszczących metod detekcji uszkodzeń konstrukcji jest obserwacja zmian jej parametrów dynamicznych. Postacie drgań swobodnych i odpowiadające im częstotliwości można otrzymać w wyniku analizy modalnej na podstawie pomiaru przyspieszeń wybranych punktów układu, będących odpowiedzią na znane wymuszenie. Zmiany parametrów dynamicznych zależą nie tylko od stanu konstrukcji, ale również od czynników zewnętrznych towarzyszących pomiarom. W artykule przedstawiono wpływ temperatury na zmiany parametrów dynamicznych układu na przykładzie dwukondygnacyjnej, stalowej ramy portalowej oraz porównano ich wielkość ze zmianami wywołanymi symulowanym uszkodzeniem w postaci luzowania łączników w połączeniach rygiel-słup.

Słowa kluczowe: monitorowanie stanu konstrukcji (SHM), analiza modalna

1. Wprowadzenie

Konieczność zapewnienia bezpieczeństwa na każdym etapie cyklu życia konstrukcji jest przyczyną ciągłego rozwoju dziedziny nazywanej monitorowaniem stanu konstrukcji (ang. Structural Health Monitoring, SHM). Określenie, czy w konstrukcji wystąpiło uszkodzenie, jakich jest ono rozmiarów i jak istotnie wpływa na bezpieczeństwo użytkowanego obiektu pozwala na wczesne podjęcie odpowiednich działań, skutkiem których mogą być znaczące korzyści ekonomiczne (naprawa uszkodzeń małych rozmiarów) lub nawet uniknięcie katastrofy budowlanej.

Wykrywanie uszkodzeń odbywa się poprzez porównanie parametrów układu w danej chwili, określonych przy pomocy metod nieniszczących, ze wzorcem uznawanym za nieuszkodzony. Ważną zaletą metod pomiarowych stosowanych w monitorowaniu jest fakt, że są one nieniszczące, a co za tym idzie nie naruszają

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Dominika Ziaja, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. (0-17)8651618, dziaja@prz.edu.pl

² Bartosz Miller, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. (0-17)8651532, bartosz.miller@prz.edu.pl

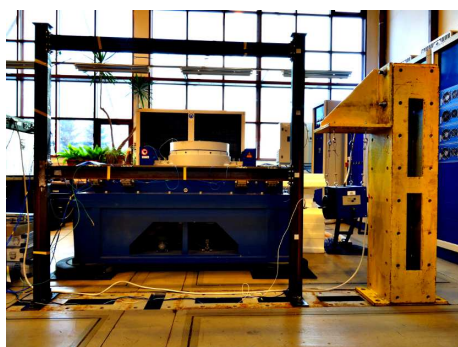
struktury badanego obiektu. Dodatkowo możliwy jest ciągły pomiar w trakcie normalnego użytkowania obiektu (brak konieczności długotrwałego wyłączenia z eksploatacji). Jedną z metod często stosowanych w monitorowaniu jest analiza modalna [1]. W metodzie tej w konstrukcji wzbudza się drgania, mierząc jednocześnie wartość siły wymuszającej, następnie rejestruje się przyspieszenia różnych punktów układu będące odpowiedzią na działanie siły wymuszającej. Na podstawie zgromadzonych danych, otrzymuje się parametry modelu modalnego jakimi są np. częstotliwości i odpowiadające im postacie drgań, charakteryzujące dany stan konstrukcji. Właśnie tę metodę zastosowano w prezentowanych badaniach.

Śledzenie zmian parametrów konstrukcji jest podstawą do oceny jej stanu. Jednak zmiany parametrów dynamicznych, jak podają np. Ko i Ni ([2]), Chatzi i Spiridonakos ([3]), czy Uhl ([4]) mogą być również wynikiem zmiany temperatury układu. Dlatego też, aby uniknąć błędnej interpretacji obserwowanych zmian, konieczne jest określenie wpływu temperatury na częstości i odpowiadające im postacie drgań swobodnych modelu.

Opisywane badania są częścią większego zadania, którego celem jest określenie procedury umożliwiającej skuteczną detekcję uszkodzeń w konstrukcjach stalowych. Ocena, czy wpływ temperatury na zmiany parametrów dynamicznych jest istotny, możliwa jest jedynie w zestawieniu ze zmianami spowodowanymi wystąpieniem uszkodzenia, dlatego w artykule porównano zmiany pochodzące od temperatury ze zmianami będącymi wynikiem symulowanego uszkodzenia.

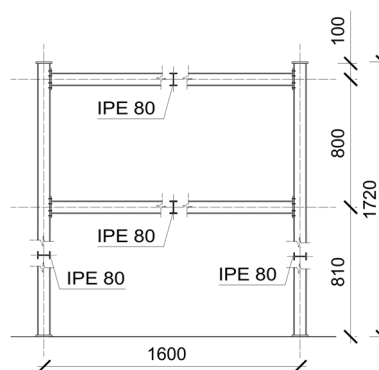
2. Opis modelu

Model laboratoryjny badanej ramy został przedstawiony na rys. 1. Rama w całości wykonana została z dwuteownika IPE 80 (stal S355), a jej wymiary w osiach elementów przedstawiono na rys. 2. Połączenia rygiel-słup oraz połącze-



Rys. 1. Model laboratoryjny ramy

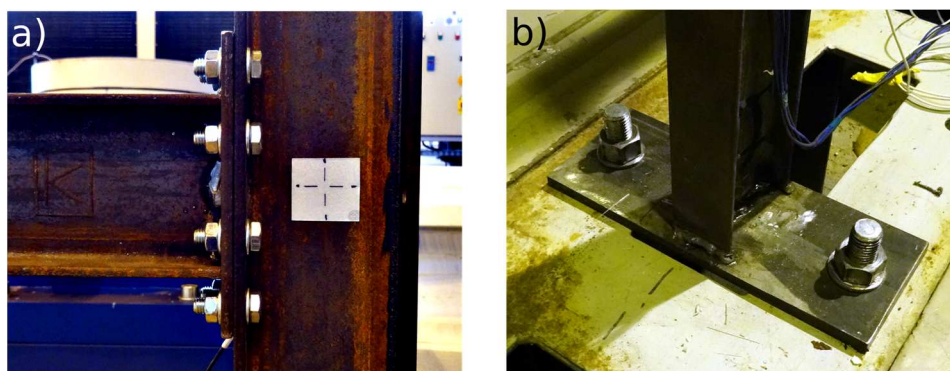
Fig. 1. Laboratory model of the frame



Rys. 2. Schemat modelu, wymiary w mm

Fig. 2. Scheme of the model, dimensions in mm

nie z fundamentem przedstawiono na rys. 3. Kształt połączenia z fundamentem wynikał z konieczności zamocowania ramy do podłogi siłowej w hali Wydziałowego Laboratorium Badań Konstrukcji Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej.



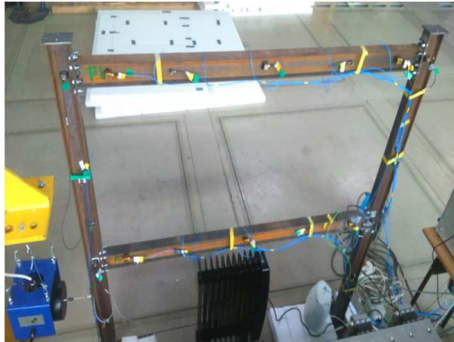
Rys. 3. Połączenia a) rygiel-słup, b) połączenie z fundamentem

Fig. 3. Connections between elements a) beam-to-column connection and b) column footing

3. Aparatura pomiarowa

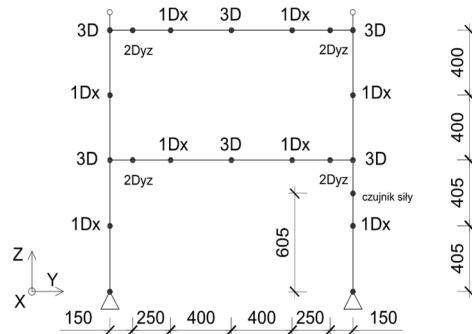
Do pomiarów drgań wykorzystano osiem jednoosiowych czujników przyspieszeń PCB Piezotronics, Inc. model T352C03, pięć trójosiowych czujników przyspieszeń B&K model 4506B003, pięć trójosiowych czujników PCB Piezotronics, Inc. model T356B18, oraz czujnik siły PCB Piezotronics, Inc. model 208C03. Czujniki zostały rozmieszczone na konstrukcji ramy w punktach wyznaczonych na podstawie analizy postaci drgań modelu numerycznego. Ramę z zamocowanymi czujnikami przedstawiono na rys. 4. Pomiary drgań wykonano na kierunkach przedstawionych na rys. 5. Oznaczenia przyjęte na rys. 5: 1D, 2D, 3D - pomiar na 1, 2 lub 3 kierunkach, x, y, z - oznaczenie kierunku pomiarowego według przyjętego układu współrzędnych. Drgania układu wzbudzano wzbudnikiem zamocowanym na dodatkowej konstrukcji wsporczej. Do wykonania pomiarów użyto oprogramowania Siemens LMS Test.Lab 15 z modułem MIMO FRF Testing. Zastosowano sygnał wymuszający w postaci białego szumu. Miejsce przyłożenia wymuszenia na rys. 5. opisano jako „czujnik siły”. Dane zbierano przy pomocy wielokanałowego rejestratora/analizatora LMS Scadas Mobile. Rejestrowany sygnał, po transformacji do dziedziny częstotliwości, miał zakres 0-200 Hz i rozdzielczość 0.097 Hz.

Pomiarom drgań układu towarzyszył pomiar temperatury. Wykorzystano dwa czujniki umieszczone na różnych wysokościach. Jednym z nich była termopara typu K połączona poprzez kondycjoner termopary do analizatora, umożliwiająca rejestrację temperatury dokładnie w czasie trwania pomiaru drgań. Sy-



Rys. 4. Model laboratoryjny ramy z zamontowanymi czujnikami

Fig. 4. Laboratory model of the frame with installed accelerometers



Rys. 5. Schemat rozmieszczenia czujników wraz z kierunkami pomiarowymi, wymiary w mm

Fig. 5. Location of accelerometers and measuring directions, dimensions in mm

gnał z czujnika temperatury każdorazowo był dołączany do danych pomiarowych, co eliminowało ryzyko wystąpienia pomyłki. Drugi czujnik temperatury, połączony z termoregulatorem, naklejony został na powierzchni ramy. Zastosowane czujniki przedstawiono na rys. 6. i rys. 7.



Rys. 6. Termopara połączona z analizatorem SCADAS Mobile

Fig. 6. Thermocouple connected to the analyzer SCADAS Mobile



Rys. 7. Czujnik temperatury

Fig. 7. Temperature sensor

4. Opis procedury badawczej

Zadanie podzielono na dwie części. W pierwszej przeprowadzono pomiary dla ramy bez uszkodzenia w różnych temperaturach towarzyszących pomiarom. W drugiej części, w normalnie panującej w hali laboratoryjnej temperaturze,

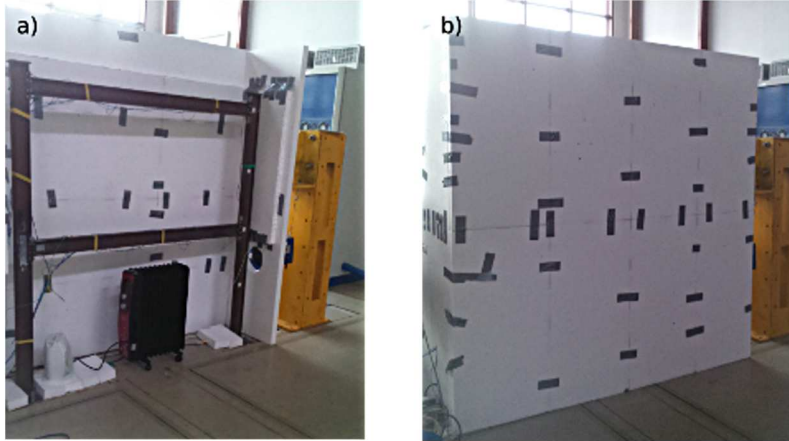
wykonano pomiary charakterystyk dynamicznych układu z uszkodzeniem. Ze względu na wstępną fazę badań dotyczących detekcji uszkodzeń w konstrukcji niemożliwe było trwałe uszkodzenie któregokolwiek z jej elementów. Wprowadzono jednak do układu zaburzenie wywołane poluzowaniem dwóch zewnętrznych rzędów śrub dla każdego z węzłów osobno. Badanie powtórzono trzykrotnie, dla czterech przypadków uszkodzenia, otrzymując w ten sposób 12 zestawów częstotliwości i form odpowiadających uszkodzeniu układu. Jeden zestaw form drgań swobodnych, odpowiadających im częstotliwości wraz z informacją o temperaturze w trakcie pomiaru w dalszej części nazywany jest wzorcem.

Pierwszą część badań (związaną z pomiarami w różnych temperaturach) wykonano w trzech etapach: w normalnej temperaturze wewnątrz hali laboratoryjnej (temperatura zmienia się w zależności od warunków atmosferycznych, w tym nasłonecznienia, jednak jesienią wynosi ona około 20°C), w temperaturze obniżonej (otwarcie bramy wjazdowej do hali w mroźny dzień) oraz w temperaturze podwyższonej (w specjalnie przygotowanej obudowie z płyt styropianowych).

W przypadku obniżenia temperatury najniższa zarejestrowana w czasie pomiaru temperatura wynosiła 9°C, pomimo, że na zewnątrz panowały temperatury ujemne. Podjęto też próbę zbudowania stanowiska na zewnątrz budynku, montując ramę i konstrukcję wsporczą wzbudnika na jednej belce stalowej, jednak zmiana warunków podparcia ramy była na tyle duża, że powodowała zmiany badanych parametrów wskazujące na uszkodzenie układu, dlatego zrezygnowano z przeniesienia stanowiska.

Ze względu na dużą bezwładność termiczną hali laboratoryjnej podgrzanie ramy wymagało wykonania specjalnej obudowy z płyt styropianowych (rys. 8). Temperatura wewnątrz obudowy podnoszona była za pomocą grzejnika olejowego sterowanego poprzez termoregulator połączony z jednym z czujników temperatury. Równomierne ogrzanie układu wymagało zastosowania wentylatora, który wymuszał cyrkulację powietrza wewnątrz obudowy. Pomiaru parametrów dynamicznych dokonywano po ustabilizowaniu temperatury, gdy różnica pomiędzy odczytami z obu czujników nie przekraczała pół stopnia Celsjusza. W temperaturze przekraczającej 40°C mocowanie czujników przyspieszeń do ramy nie było stabilne (czujniki były klejone na wosku), dlatego ograniczono zakres temperatur do górnej wartości nie przekraczającej 36°C.

Pomimo ograniczonego zakresu temperatur w trakcie pomiarów dynamicznych można przyjąć, że był on wystarczający dla potrzeb zadania. Badania nad identyfikacją uszkodzeń w ramie będą odbywały się zawsze w hali laboratorium, a tam, w normalnych warunkach temperatura nie spada poniżej 16°C (jesień) oraz nie wzrasta powyżej 32°C (w lecie i przy pracy maszyn).

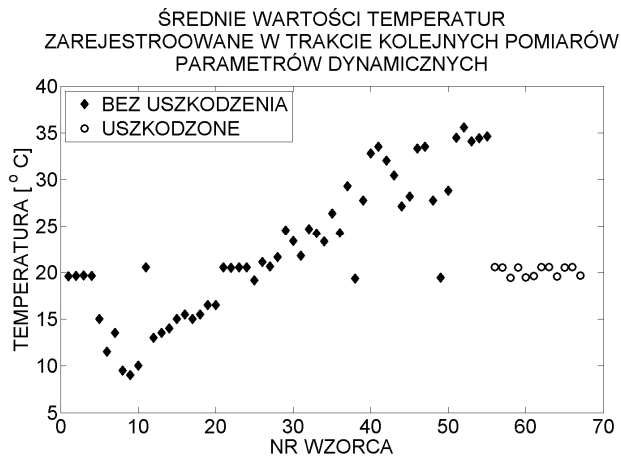


Rys. 8. Stanowisko pomiarowe do badania parametrów dynamicznych w różnych temperaturach. a) rozmieszczenie urządzeń i badanego obiektu wewnątrz obudowy, b) stanowisko w trakcie pomiarów

Fig. 8. Measuring station for vibration testing at different temperatures. a) the location of equipment and the examined frame inside the enclosure, b) measuring station during the experiment

5. Analiza danych pomiarowych

W trakcie badań zarejestrowano 68 wzorców pomiarowych w ustabilizowanej temperaturze w tym: 56 wzorców bez uszkodzenia oraz 12 uszkodzonych. Średnie temperatury ramy w trakcie każdego z pomiarów zestawiono na rys. 9.



Rys. 9. Średnie wartości temperatur towarzyszące każdemu z przeprowadzonych pomiarów

Fig. 9. Average temperature values associated with each of the performed measurements

Wzorzec nr 1 uznano za bazowy, następnie kolejne wzorce uszeregowano według temperatury w trakcie pomiaru.

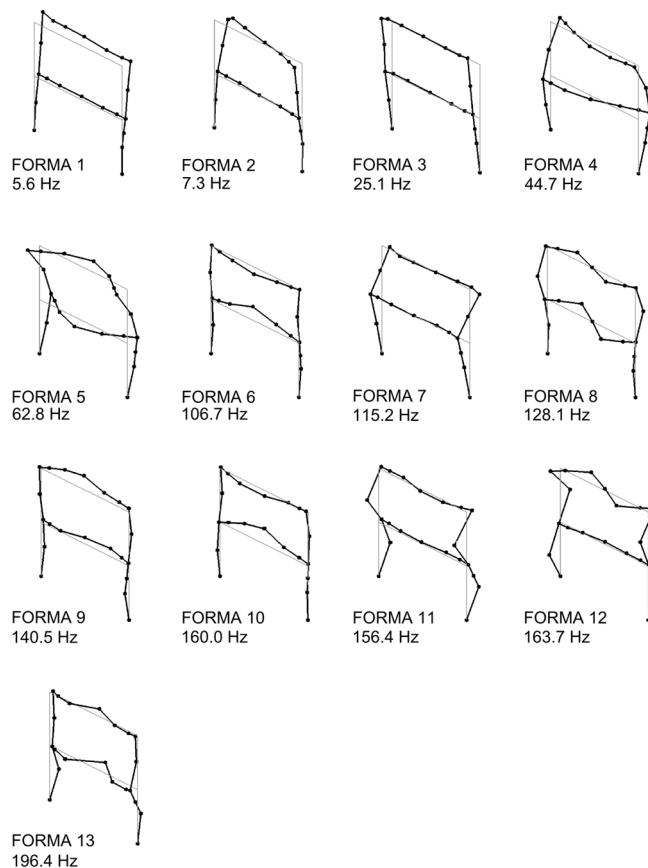
Wykorzystano LMS Test.Lab 15 oraz algorytm PolyMAX ([5]). Postacie i częstotliwości dla wzorca porównawczego zestawiono na rys. 10.

Wzorce pomiarowe porównywano ze wzorcem bazowym. Jako podstawowe kryterium podobieństwa uznano możliwość identyfikacji poszczególnych postaci drgań. Ocena podobieństwa form odbywała się na podstawie wartości współczynnika MAC, wyrażonego wzorem z pracy [6] w postaci:

$$MAC_{jk} = \frac{|\Phi_{mj}^T \Phi_{ak}|^2}{(\Phi_{ak}^T \Phi_{ak})(\Phi_{mj}^T \Phi_{mj})} \quad (1)$$

gdzie: Φ_{mj} - wektor opisujący otrzymaną z pomiarów j-tą formę drgań,

Φ_{ak} - k-ta forma drgań wzorca porównawczego.

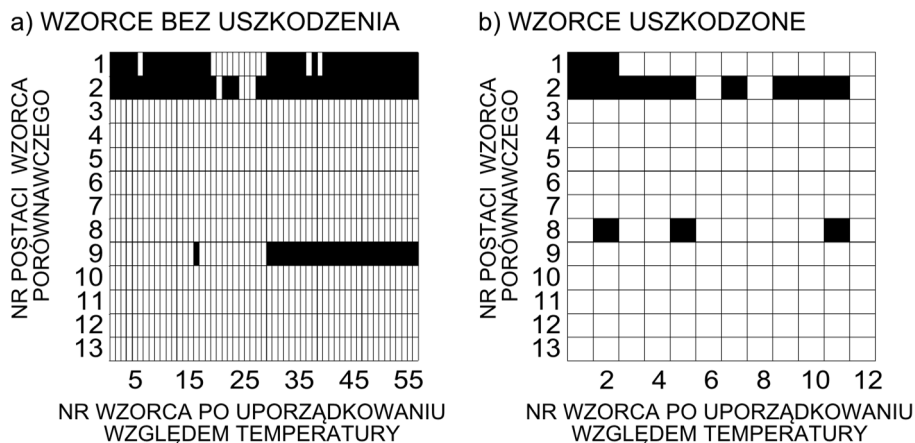


Rys. 10. Formy i częstotliwości drgań otrzymane dla wzorca porównawczego

Fig. 10. Frequencies and forms obtained for the base pattern

Wartość współczynnika większa od 0,8 oznaczała, że badane postaci odpowiadają sobie, więc w kolejnym kroku możliwe jest porównywanie wartości częstotliwości otrzymanych z pomiarów dla odpowiadających sobie form. Ze-stawienie zidentyfikowanych form przedstawiono obrazowo na rys. 11. (zmiana temperatury towarzyszącej kolejnym pomiarom nie jest liniowa, dlatego nie zaznaczono temperatur na osi poziomej, konkretne wartości można sprawdzić analizując rys. 9). W kolumnach zaprezentowano wzorce uporządkowane kolejno ze względu na temperaturę towarzyszącą pomiarom. Każdy wiersz przedstawionych macierzy odpowiada kolejnej postaci wzorca porównawczego. Jeżeli w danym wzorcu zidentyfikowano odpowiednią postać wzorca porównawczego na przecięciu wiersza i kolumny wstawiono białe pole, jeśli dana postać nie wystąpiła pole pozostawiono w kolorze czarnym. Cały wiersz w białym kolorze oznacza, że daną postać zidentyfikowano podczas pomiarów we wszystkich temperaturach. Postaci pierwsza i druga nie zostały zidentyfikowane w większości wzorców, dlatego też w dalszej analizie zostały pominięte, jako niemiernodajne. Ponieważ we wszystkich wzorcach prawie wszystkie postaci zostały zidentyfikowane to wybór wzorca porównawczego (spośród wzorców nieuszkodzonych w zwykle występującej w hali temperaturze) w kontekście prezentowanych poniżej wyników nie ma większego znaczenia.

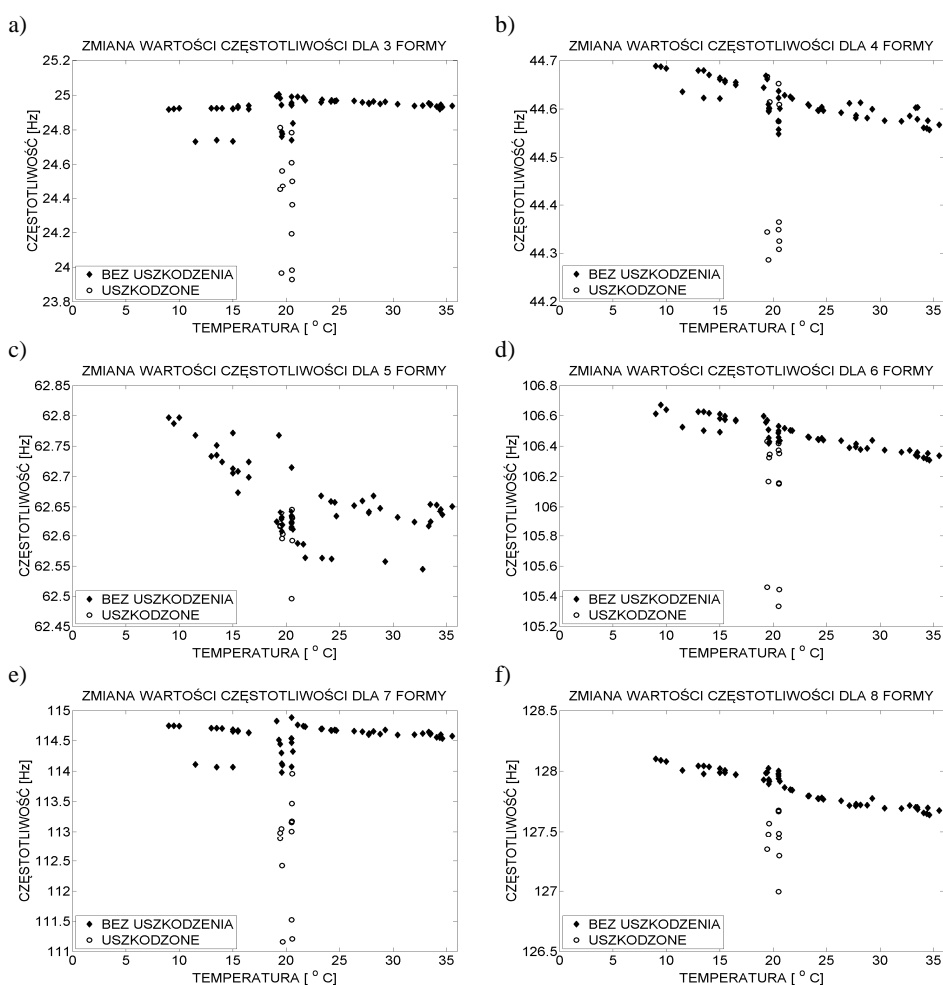
Analizując wartości współczynnika MAC dla wzorców bez uszkodzenia w zależności od temperatury pomiaru stwierdzono, że zmiana temperatury układu nie ma znaczącego wpływu na stopień dopasowania kolejnych form drgań swobodnych poza 9 formą, która w żadnym ze wzorców w temperaturze powyżej 21°C nie została zidentyfikowana.



Rys. 11. Zidentyfikowane postaci odpowiadające postaciom wzorca porównawczego a) dla wzorców bez uszkodzenia i b) dla wzorców uszkodzonych

Fig. 11. Identified modal shapes of base pattern a) for undamaged data set and b) for damaged patterns

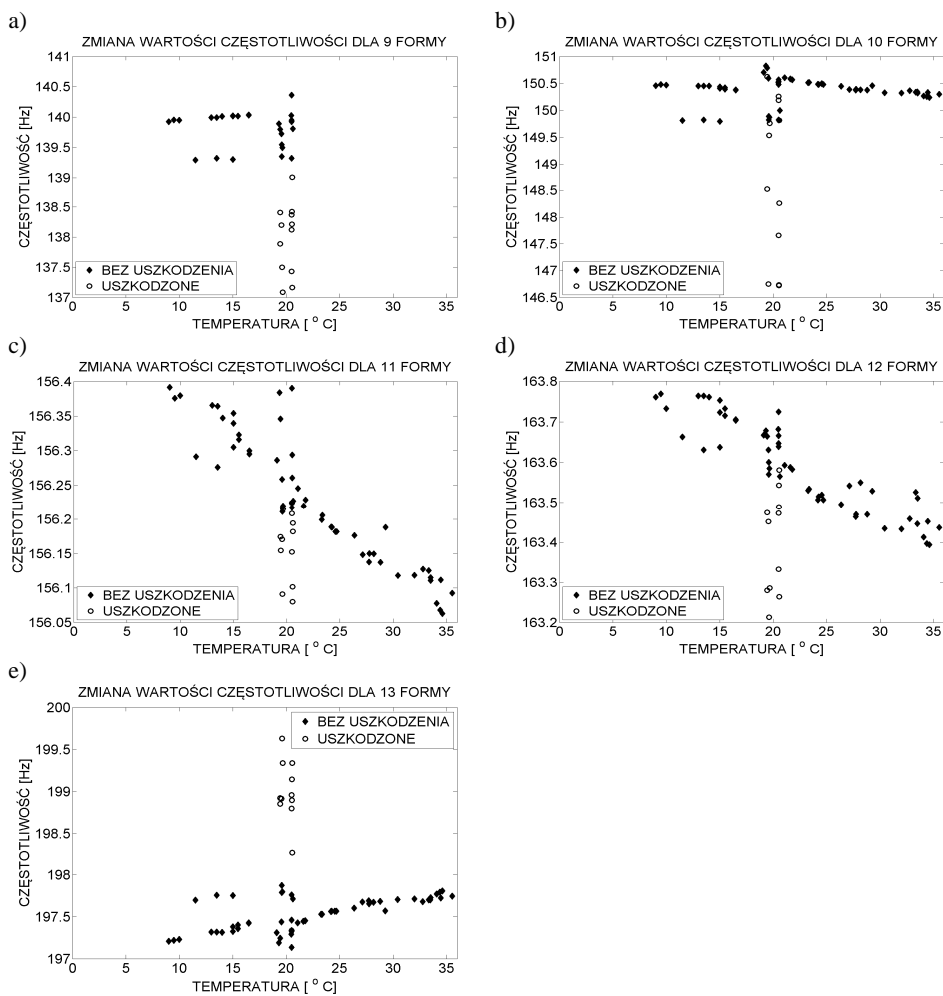
Wyraźny wpływ temperatury jest natomiast zauważalny w przypadku wartości odpowiednich częstotliwości. Na rys. 12. i rys. 13. przedstawiono zmiany częstotliwości odpowiadających kolejnym postaciom wzorca porównawczego. W przypadku większości form, dla wzorców nieuszkodzonych można zaobserwować wyraźny spadek wartości częstotliwości drgań swobodnych (do 0.5 Hz) wraz ze wzrostem temperatury. Aby ocenić czy jest on istotny, na tych samych wykresach pokazano również zmiany spowodowane uszkodzeniem. Dla niektórych z rozpatrywanych form zmiany wywołane obiema przyczynami są zbliżone. Przykładowo dla formy 5, 11 i 12 ocena przyczyny na podstawie wyłącznie war-



Rys. 12. Zmiana wartości częstotliwości dla identyfikowanych postaci odpowiadających od 3 do 8 postaci wzorca porównawczego, w zależności od temperatury w trakcie pomiaru

Fig. 12. Changes in the values of frequency corresponding to the modal forms from 3 to 8, depending on the temperature during the measurement

tości danej częstotliwości jest niemożliwa. Podobna sytuacja ma miejsce dla części wzorców w przypadku formy 4 i 10. Na rys. 12. i rys. 13. zaznaczono uszkodzenia niezależnie od ich typu (uszkodzenia czterech różnych węzłów). Możliwe więc, że dla jednego, bądź kilku z nich zmiany wywołane temperaturą mogą zostać mylnie zinterpretowane jako uszkodzenie. Porównując zmiany wywołane uszkodzeniem i temperaturą można wybrać takie częstotliwości, dla których efekt wywołany zmianą temperatury jest dużo mniejszy niż efekt wywołany uszkodzeniem (postać 3, 7, 8 i 13). Należałoby rozważyć możliwość wykorzystania w trakcie dalszych badań związanych z detekcją uszkodzeń właśnie tych postaci.



Rys. 13. Zmiana wartości częstotliwości dla identyfikowanych postaci odpowiadających od 9 do 13 postaci wzorca porównawczego, w zależności od temperatury w trakcie pomiaru

Fig. 13. Changes in the values of frequency corresponding to the modal forms from 9 to 13, depending on the temperature during the measurement

6. Wnioski

Temperatura towarzysząca pomiarom dynamicznym ma wpływ na częstotliwości drgań swobodnych układu. Zmiany te nie są pomijalne, ponieważ ich wielkość jest porównywalna ze zmianami wywołanymi przez uszkodzenie konstrukcji. W kontekście monitorowania stanu konstrukcji brak informacji o temperaturze może obniżać dokładność wykrywania uszkodzeń, jeśli w procedurze detekcji przyjęto jako parametry do identyfikacji właśnie częstotliwości drgań (jak np. w [7]). Dlatego też, jeśli detekcja uszkodzeń będzie bazowała na informacji o częstotliwościach drgań, należy bądź to zgromadzić odpowiednią bazę wzorców zapewniających określenie reakcji układu na zmiany temperatury, bądź ograniczyć się do przeprowadzenia pomiarów w stałych warunkach temperaturowych. Należy zaznaczyć, że przeprowadzone badania zostały zawężone do zakresu 9-35,5°C. Dla niektórych konstrukcji praca w tak szerokim zakresie temperatur nie będzie miała miejsca, są jednak i takie, dla których prezentowany zakres jest jedynie wąskim przedziałem wśród wszystkich możliwych do wystąpienia temperatur (np. dla obiektów mostowych, w których temperatura pracy może zmieniać się nawet od -25 do +50°C [8]). Można się więc spodziewać, że rola jaką odgrywa temperatura w tego typu konstrukcjach jest jeszcze większa.

Podziękowania

Do badań wykorzystano aparaturę zakupioną w projekcie nr POPW.01.03.00-18-012/09 z Funduszy Strukturalnych w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Regionalnego.

Literatura

- [1] Wilde K.: Modal Diagnostics Of Civil Engineering Structures, Gdańsk University Of Technology Publishers, Gdańsk 2008.
- [2] Ko J.M., Ni Y.Q.: Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges, *Engineering Structures* 27, 2005, s. 1715-1725.
- [3] Eleni N. Chatzi, Minas D. Spiridonakos: Structural Identification and Monitoring based on Uncertain/Limited Information, *MATEC Web of Conferences* 24,01003, 2015.
- [4] Uhl T., Berczyński S., Hanc A., Sękiewicz Ł.: Rozproszony system monitorowania mostów, *DIAGNOSTYKA'35*.
- [5] LMS Test.Lab MIMO FRF Testing 15A, User manual, Siemens Industry Software NV.
- [6] UHL T.: Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
- [7] Ziaja D., Miller B.: Detekcja uszkodzeń na przykładzie dwukondygnacyjnej ramy portalowej z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury – Journal Of Civil Engineering, Environment And Architecture, JCEEA*, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 579-588.

- [8] Onysyk H.: Analiza zmian temperatury stalowej konstrukcji mostu przez Wisłę w Puławach, Drogi i Mosty, nr 1/2012, s. 35-52.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE CHANGE OF DYNAMIC PARAMETERS OF A TWO-STOREY STEEL PORTAL FRAME

S u m m a r y

One of the non-destructive testing methods is damage detection based on changes in dynamic parameters of the structure. For this purpose modal analysis could be used, where natural frequencies and forms are calculated using measured data. During experiment an examined structure is excited by external force with known value, and its vibration (accelerations in some selected points) are measured. This method was used in presented research. Unfortunately not only material characteristics or geometric and static feature of the system have an influence of the dynamic parameters. Also the external conditions during measurements can change the dynamic response of the structure. The aim of this subject was checking, is temperature affect on the dynamic parameters and how big are the changes, the source of which is the temperature. To evaluate the scale of described changes, in a laboratory model of two-storey steel portal frame, in each of beam-to-column connection separately, four from eight bolts were loosed. This action had to simulate the damage of the structure. In this paper the effects of temperature and simulated damages were compared.

Keywords: structural health monitoring (SHM), modal analysis

Przesłano do redakcji: 22.02.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Anna WIEPRZKOWICZ¹
Dariusz HEIM²

WSPÓŁCZYNNIK TŁUMIENIA AMPLITUDY WAHAŃ TEMPERATURY IZOLACJI TERMICZNEJ MODYFIKOWANEJ MATERIAŁEM FAZOWO ZMIENNYM

Celem artykułu jest wyznaczenie stabilności termicznej komponentu izolacyjnego modyfikowanego warstwą MFZ. Analiza została przeprowadzona w stanie niestacjonarnym na podstawie rozkładu temperatury w przekroju ściany. Zaprezentowane zostały wyniki obliczeń przeprowadzonych dla dwóch wprowadzonych przez autorów, zmodyfikowanych współczynników tłumienia (ZWT i ZWWT), pozwalających w pełni określić efekt zastosowania warstwy MFZ na stabilizację termiczną przegrody zewnętrznej. Współczynniki określono na podstawie analiz symulacyjnych w Polskich warunkach klimatycznych. Porównanie wyników uzyskanych dla przegrody referencyjnej oraz modyfikowanej warstwą MFZ pokazuje różnice w wartościach ZWT od kilku do kilkunastu procent zależności od analizowanego dnia wybranego okresu czasu.

Słowa kluczowe: dynamika cieplna, symulacja komputerowa, ściana zewnętrzna, sezon ogrzewczy, budynek zero-energetyczny

1. Wprowadzenie

Głównym zadaniem przegród zewnętrznych budynku jest utrzymanie stabilnych warunków cieplnych wewnątrz pomieszczeń, podczas gdy parametry środowiska zewnętrznego zmieniają się w sposób dynamiczny i nieregularny. Podstawowym parametrem determinującym strumień ciepła przenikającego przez warstwę materiału jest współczynnik przewodzenia ciepła, pozwalający określić jej oporność cieplną. Niemniej jednak, nie uwzględnia on bezwładności cieplnej oraz dynamiki reakcji warstwy a tym samym całej przegrody na zmie-

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Anna Wieprzkowicz, Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Środowiska, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź; tel. 42 631 39 20; anna.wieprzkowicz@p.lodz.pl

² Dariusz Heim, Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Środowiska, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź; tel. 42 631 39 20; dariusz.heim@p.lodz.pl

niające się warunki brzegowe. Nowo projektowane fasady budynków powinny nie tylko ograniczać straty ciepła ale również w efektywny sposób wykorzystywać zyski ciepła, w ciągu całego roku. Zdolność do magazynowania ciepła i stabilizacji termicznej przegród determinowana jest masą termiczną materiałów, a zatem zdolnością akumulacji ciepła, zarówno jawnego i utajonego.

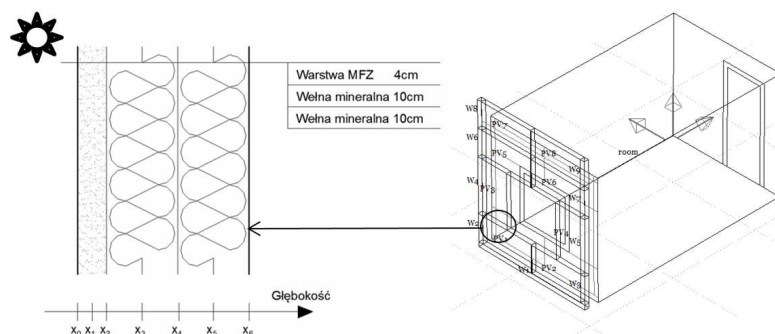
Konieczność uwzględnienia masy termicznej ściany w ocenie jej efektywności energetycznej została zidentyfikowana i opisana w literaturze za pomocą współczynników charakteryzujących rozkład oporności cieplnej i masy termicznej w przegrodach wielowarstwowych [1]. Kolejnym parametrem, pozwalającym ocenić dane rozwiązanie konstrukcyjne z uwzględnieniem zarówno pojemności jak i przewodności cieplnej, jest współczynnik tłumienia temperatury [2]. Wykorzystując ten parametr, możliwe jest określenie wpływu różnych konfiguracji materiałów izolacyjnych i konstrukcyjnych na warunki termiczne wewnątrz budynku [3, 4]. Współczynnik tłumienia jest obliczany jako stosunek dobowych amplitud wahań temperatury wewnętrznej i zewnętrznej. Wartość ta odzwierciedla zdolność przegrody do wytłumienia wpływu zmieniających się warunków środowiska zewnętrznego oraz stabilizacji temperatury przegrody. Wpływ właściwości fizycznych materiałów oraz absorpcyjności promieniowania słonecznego zewnętrznej powierzchni przegrody na wartość współczynnika tłumienia został opisany w literaturze [5, 6]. Wartość współczynnika tłumienia może być wyznaczona dla rzeczywistych warunków klimatycznych [7] lub uśrednionych sinusoidalnych przebiegów zmian temperatury.

Ocena dynamicznej charakterystyki cieplnej ścian zewnętrznych modyfikowanych Materiałami Fazowo Zmiennymi (MFZ), ze względu na zmieniające się wraz z temperaturą materiału właściwości cieplne, nie może być przeprowadzona bezpośrednio wykorzystując współczynnik tłumienia [8]. Charakterystyka termiczna MFZ zależy od szybkości akumulacji i oddawania ciepła, stanu skupienia oraz zakresu wahań temperatury. Niemniej jednak, współczynnik tłumienia obliczany w zmodyfikowany sposób był wykorzystywany do oceny efektywności zastosowania MFZ w przegrodach transparentnych [9] oraz pełnych [10].

Celem podjętej pracy jest wyznaczenie stabilności termicznej komponentu izolacyjnego modyfikowanego warstwą MFZ. Analiza została przeprowadzona w układzie niestacjonarnym na podstawie rozkładu temperatury w przekroju ściany oraz efektywności akumulacji ciepła utajonego. Zaprezentowane zostały wyniki obliczeń przeprowadzonych dla dwóch wprowadzonych przez autorów, zmodyfikowanych współczynników tłumienia, pozwalających w pełni opisać efekt zastosowania warstwy MFZ na stabilizację termiczną przegrody zewnętrznej.

2. Opis analizowanego przypadku

Przedstawiona analiza dotyczy badania dynamicznej charakterystyki cieplnej ściany zewnętrznej. Dlatego też, model budynku poddany analizie numerycznej został ograniczony do jednej strefy (rys. 1). Założono, że jedna ze ścian,



Rys. 1. Schematyczny widok analizowanego pomieszczenia oraz konstrukcji ściany zewnętrznej

Fig. 1. Schematic view of analysed room and wall construction

zwrócona na zachód, będzie pełnić funkcję ściany zewnętrznej, natomiast pozostałe przegrody przyjęto jako wewnętrzne i założono identyczne warunki brzegowe dla wymiany ciepła po obu stronach przegrody. Aby ograniczyć wpływ przegród wewnętrznych na parametry cieplne pomieszczenia przyjęto ich dodatkową izolację.

Analizowana ściana zewnętrzna jest wykonana w konstrukcji lekkiej, z wełny mineralnej oraz warstwy kompozytu zawierającej wosk parafinowy. Właściwości przyjętych do analizy materiałów podano w tabeli 1. Wartości przewodności cieplnej i gęstości, mające największy wpływ na charakterystykę cieplną warstwy, zostały przyjęte na podstawie wyników badań eksperymentalnych.

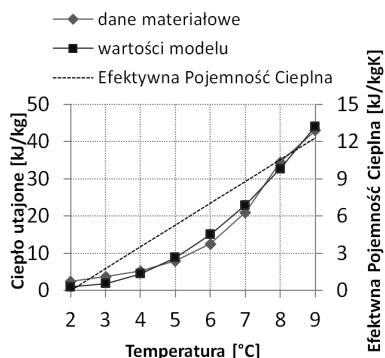
Tabela 1. Właściwości materiałów użyte w symulacji

Table 1. Material properties used in simulation

Materiał	Grubość [m]	Przewodność cieplna [W/m·K]		Gęstość [kg/m ³]	Ciepło właściwe [kJ/kg·K]
		c. stałe	ciecz		
Komponent MFZ	0,04	0,16	0,13	467	2000
Wełna miner.	0,20	0,034		110	750

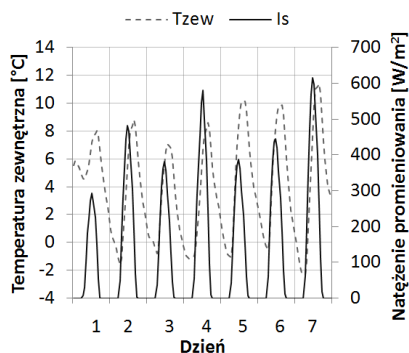
Celem analizy jest ocena stabilności termicznej ściany zewnętrznej modyfikowanej MFZ, w okresie charakteryzującym się niską temperaturą zewnętrzną i wysokim natężeniem promieniowania słonecznego. MFZ wykazuje zdolność magazynowania ciepła utajonego w określonym zakresie temperatur. Problem doboru materiału odpowiadającego danemu zakresowi zmian warunków środowiska zewnętrznego był przedmiotem wcześniejszych badań autorów [11]. Na tej podstawie, na potrzeby poniższej analizy wybrano materiał wykazujący się najwyższą zdolnością akumulacji ciepła utajonego w zakresie od 7°C do 9°C (rys. 2).

Symulacje zostały przeprowadzone dla Typowego Roku Meteorologicznego, dla danych klimatycznych miasta Łodzi. W celu przeprowadzenia dokładnej i kompleksowej analizy, przedstawiono wyniki dla wybranego tygodnia zimy, charakteryzującego się znacznymi dobowymi wahaniami temperatury oraz dużym natężeniem promieniowania słonecznego (rys. 3).



Rys. 2. Zależność pomiędzy wartością ciepła utajonego w funkcji temperatury oraz odpowiadające jej wartości użyte w modelu teoretycznym

Fig. 2. Values of apparent heat capacity used in simulation and corresponding values of modelled latent heat compared to latent heat of real material



Rys. 3. Historia zmian temperatury zewnętrznej oraz natężenia promieniowania słonecznego w analizowanym okresie

Fig. 3. History of external temperature and solar irradiance during analysed period

3. Metodyka

Analiza została wykonana na podstawie wyników symulacji uzyskanych za pomocą programu ESP-r. Dynamiczny model obliczeniowy zaimplementowany w programie został opisany m.in. w pracach [12, 13]. Ilość zakumulowanego ciepła utajonego, w zakresie temperatur przemiany fazowej, została wyznaczona metodą Efektywnej Pojemności Ciepłej (ang. Effective Heat Capacity). Równania różniczkowe przewodzenia ciepła są dyskretyzowane dla każdej skończonej objętości modelowanego pomieszczenia, reprezentowanej przez węzeł o parametrach skupionych. Oznacza to, że dla każdej warstwy przegrody przypisane zostały trzy węzły, z których dwa znajdują się na powierzchniach brzegowych i jeden w środku danej warstwy. W celu zwiększenia dokładności modelu i uzyskanych wyników, warstwa izolacji została podzielona na dwie części. Pozwoliło to na uzyskanie wartości temperatury w siedmiu charakterystycznych punktach w przekroju ściany (x_0, x_1, \dots, x_6).

Efekt akumulacji ciepła utajonego został opisany poprzez zaproponowane przez autorów dwa parametry bazujące na współczynniku tłumienia. Oba z nich

obliczane są na podstawie zmieniających się w czasie rozkładów temperatury w przekroju poprzecznym ściany. Na potrzeby analizy porównawczej wprowadzono dodatkowo przypadek referencyjny o identycznej konstrukcji, ale nie wykazujący zdolności akumulacji ciepła utajonego.

Pierwszym z wprowadzonych parametrów jest Zmodyfikowany Współczynnik Tłumienia (ZWT), opisujący tłumienie wahań temperatury na zewnętrznej powierzchni ściany. Obliczany jest jako procent zmniejszenia amplitudy temperatury przez warstwę zewnętrzną ściany w stosunku do amplitudy temperatury na powierzchni zewnętrznej:

$$ZWT = \frac{\Delta T(x_0) - \Delta T(x_2)}{\Delta T(x_0)} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

gdzie: $\Delta T(x_i)$ – dobowa amplituda temperatur na danej głębokości przegrody.

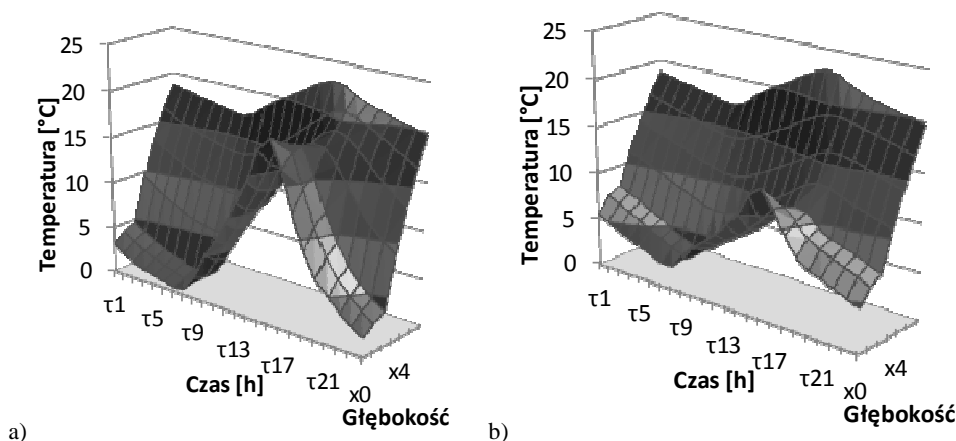
Wartość podstawowego współczynnika tłumienia obliczana jest na podstawie temperatury zewnętrznej, zakładając pierwszy rodzaj warunków brzegowych. Wartość ZWT obliczana jest biorąc pod uwagę rzeczywiste warunki klimatyczne, w tym również zmienne w czasie natężenie promieniowania słonecznego. Na podstawie wzoru 1, można przyjąć, że im wyższa wartość ZWT, tym wyższą zdolność do stabilizacji temperatury wykazuje analizowana warstwa zewnętrzna ściany. Wartość tego współczynnika obliczono dla każdego dnia analizy, dla przypadku przegrody modyfikowanej MFZ oraz referencyjnego.

Drugim współczynnikiem zaproponowanym przez autorów jest Zmodyfikowany Względny Współczynnik Tłumienia (ZWWT), oceniający efekt zastosowanego MFZ w stosunku do efektu uzyskanego w przypadku referencyjnym. Parametr ZWWT został obliczony dla siedmiu charakterystycznych punktów w przekroju poprzecznym przegrody, pozwalając na ocenę efektu tłumienia temperatury na głębokości ściany:

$$ZWWT = \frac{\Delta T_{ref}(x_i) - \Delta T_{MFZ}(x_i)}{\Delta T_{ref}(x_i)} \cdot 100[\%], i = \{0,1,\dots,6\} \quad (2)$$

4. Analiza wyników

Wartości dwóch zaproponowanych parametrów ZWT i ZWWT wyznaczone zostały na podstawie zmiennych w czasie rozkładów temperatury w przekroju poprzecznym ściany (rys. 4). Na podstawie tak przedstawionych wyników można zauważyć, że zastosowanie warstwy MFZ od strony zewnętrznej przyczynia się: do stabilizacji temperatury powierzchni, utrzymania temperatury w warstwie MFZ w zakresie temperatur przemiany fazowej, zmniejszenia wahań temperatury w warstwie izolacji. Ponadto, zauważyć można że największe różnice pomiędzy wynikami otrzymanymi dla dwóch analizowanych przypadków zostały uzyskane w okresie największego natężenia promieniowania słonecznego. Potwier-



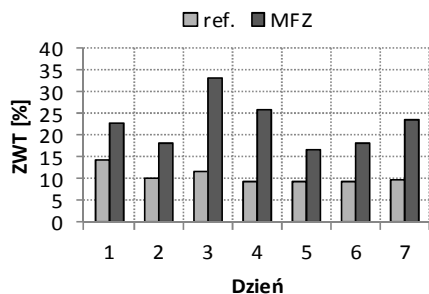
Rys. 4. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym ściany dla przypadku: a) referencyjnego, b) modyfikowanego MFZ

Fig. 4. The temperature distribution in the cross section of the wall for case: a) without PCM, b) with PCM

dza to konieczność kompleksowego uwzględnienia warunków pogodowych, a nie tylko temperatury zewnętrznej jak w przypadku standardowego współczynnika tłumienia.

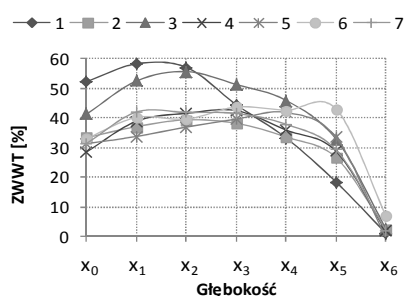
Uzyskane wartości ZWT pozwalają na ilościowe określenie uzyskanego efektu akumulacji ciepła utajonego. Wyniki przedstawione na rysunku 5 wskazują, że zwiększenie pojemności cieplnej zewnętrznej warstwy przegrody – warstwy w której występują duże wahania temperatury – pozwala na skuteczne zmniejszenie wpływu intensywnie zmieniających się warunków zewnętrznych na temperaturę przegrody. Wartości ZWT otrzymane dla przypadku referencyjnego zmieniają się w przedziale od 9% do 14%, podczas gdy dla przypadku modyfikowanego MFZ od 17% do 34%.

Wyniki przedstawione na rysunku 6 pokazują różnicę pomiędzy występującą amplitudą temperatur dobowych w analizowanych dwóch przypadkach: modyfikowanym MFZ i referencyjnym, na określonej głębokości w ścianie. Można zauważyć, że największy efekt akumulacji ciepła utajonego dla większości dni, analizowanego okresu czasu, występuje w warstwie MFZ. Niemniej jednak, wartości są znaczące również na większych głębokościach ściany, w warstwie izolacji. Potwierdza to tezę, że zastosowanie MFZ na zewnętrznej powierzchni ściany ma wpływ na charakterystykę termiczną całej przegrody.



Rys. 5. Uzyskane wartości ZWT w analizowanym okresie czasu

Fig. 5. Values of ZWT for analysed period of time



Rys. 6. Uzyskane wartości ZWWT w analizowanym okresie czasu

Fig. 6. Values of ZWWT for analysed period of time

5. Podsumowanie

W artykule zaproponowane zostały dwa współczynniki określające tłumienie amplitudy wahań temperatur przez przegrody modyfikowane warstwą MFZ, uwzględniające kompleksowo warunki klimatu zewnętrznego takie jak: temperatura zewnętrzna, natężenie promieniowania słonecznego, kierunek i prędkość wiatru. Wyznaczenie wartości powyższych parametrów pozwoliło na ilościowe określenie możliwości stabilizacji temperatury przegrody poprzez zastosowanie MFZ. Na podstawie pokazanych wyników można stwierdzić, że wprowadzenie dodatkowej warstwy MFZ przyczynia się do stabilizacji temperatury w zakresie temperatur przemiany fazowej w warstwie MFZ, jak również do zmniejszenia wahań temperatury w całej przegrodzie.

Literatura

- [1] Kossecka E., Kosny J.: Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building. *Energy and Buildings*, vol. 34, 2002, pp. 321-331.
- [2] Asan H., Sancaktar Y.S.: Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, vol. 28, 1998, pp. 159-166.
- [3] Al-Sanea S.A., Zedan M.F., Al-Hussain S.N.: Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential. *Applied Energy*, vol. 89, 2012, pp. 430-442.
- [4] Mavromatidis L.E., Mankibi M., Michel P., Santamouris M.: Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climatic zones. *Applied Energy*, vol. 92, 2012, pp. 480-491.
- [5] Asan H.: Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. *Building and Environment*, vol. 41, 2006, pp. 615-620.
- [6] Kontoleon K.J., Eumorfopoulou E.A.: The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region. *Renewable Energy*, vol. 33, 2008, pp. 1652-1664.

- [7] Larsen S.F., Filippín C., Lesino G.: Thermal behavior of building walls in summer: comparison of available analytical methods and experimental results for a case study. *Building Simulation*, vol. 2, 2009, pp. 3-18.
- [8] Zhang Y., Lin K., Jiang Y., Zhou G.: Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard. *Energy and Buildings*, vol. 40, 2008, pp. 1771-1779.
- [9] Zhong K., Li S., Sun G., Li S., Zhang X.: Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change materia. *Energy and Buildings*, vol. 106, 2015, pp. 87-95.
- [10] Mandilaras I., Stamatiadou M., Katsourinis D., Zannis G., Founti M.: Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls. *Building and Environment*, vol. 61, 2013, pp. 93-103.
- [11] Heim D., Wieprzkowicz A.: Positioning of an isothermal heat storage layer in a building wall exposed to the external environment. *Journal of Building Physics Simulation*, styczeń 2016.
- [12] Clarke A.J.: *Energy Simulation in Building Design*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford 2001.
- [13] Heim D., Clarke J.A.: Numerical modeling and thermal simulation of PCM-gypsum composite with ESP-r. *Energy and Buildings*, vol. 36, 2004, pp. 795-805.

DECREMENT FACTOR OF THERMAL INSULATION MODIFIED BY PHASE CHANGE MATERIAL

S u m m a r y

The aim of presented study is to determine the thermal stability of the modified insulation layer by PCM. The analysis was carried out using results obtained by dynamic model of heat transfer based on the temperature distribution in the wall section. The authors proposed two modified decrement factors (MDF and MRDF), which can be used to determine the effect of the PCM layer application to thermal stabilization of the outer layer of external partition. The coefficients was determined based on the results of simulation analysis carried out for Polish climatic conditions. Comparison of the results obtained for the reference and the modified external wall showed the differences in the values of MDF from a few to several percent depending on the analyzed period of time.

Keywords: thermal dynamic, computer simulation, external wall, heating season, zero-energy building

Przesłano do redakcji: 29.05.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Mateusz SZARATA¹
Piotr NAZARKO²

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO KALIBRACJI MODELI MIKROSYMULACYJNYCH

Komputerowe modele ruchu drogowego są powszechnie wykorzystywane do analiz przepustowości i sprawności sieci drogowo-parkingowej. Budowa modeli mikrosymulacyjnych jest procesem długotrwałym i złożonym. Jednym z najbardziej czasochłonnych etapów jest kalibracja modelu. Możliwe jest znaczne przyspieszenie tego procesu poprzez wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do szacowania potencjalnie najkorzystniejszych kombinacji parametrów modelu ruchu. W pracy przedstawiono sposób budowy sieci neuronowych na potrzeby modelowania ruchu na wybranym odcinku drogi oraz zaproponowano procedurę umożliwiającą kalibrację mikrosymulacyjnego modelu ruchu.

Słowa kluczowe: kalibracja modeli mikrosymulacyjnych ruchu drogowego, sztuczne sieci neuronowe, budowa mikrosymulacyjnego modelu ruchu, inżynieria ruchu

1. Wstęp

Modele mikrosymulacyjne ruchu drogowego w ostatnich latach są powszechnie wykorzystywane do przeprowadzania złożonych analiz przepustowości, oceny warunków ruchu oraz logiki sterowania sygnalizacją świetlną. Budowa modeli mikrosymulacyjnych ruchu drogowego jest procesem długotrwałym i złożonym. Wymaga nie tylko przeprowadzenia badań ruchu i odwzorowania sieci drogowej ale również uwzględnienia zachowań kierowców. Proces kalibracji modeli ruchu zakłada przeprowadzenie serii symulacji umożliwiających poprawną kalibrację i uzyskanie modelu bazowego odzwierciedlającego stan bieżący. Jedną z możliwości kalibracji modeli jest metoda eksperymentalna, w której użytkownik ręcznie zmienia parametry modelu. W celu przyspieszenia prac możliwe jest wykorzystanie odpowiednich struktur matematycznych, które umożliwią wygenerowanie

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Mateusz Szarata, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa Inżynierii Środowiska i Architektury, Zakład Dróg i Mostów, matsza@prz.edu.pl

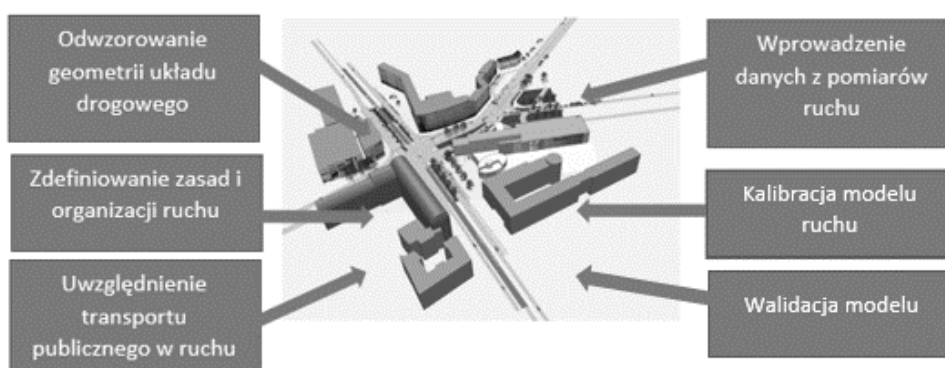
² Piotr Nazarko, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa Inżynierii Środowiska i Architektury, Zakład Mechaniki Konstrukcji, pnazarko@prz.edu.pl

najlepszej kombinacji zmiennych. Jedną z metod umożliwiającą właściwe skonfigurowanie modelu są sztuczne sieci neuronowe (SSN). Są one stosowane do rozwiązywania wielu praktycznych problemów, w których proces otrzymania wyniku na podstawie wprowadzonych danych wejściowych jest skomplikowany i trudny do opisanego i przewidzenia. Przykładem skutecznego zastosowania SSN do kalibracji modeli mikrosymulacyjnych może być publikacja [1]. Autor opracował kompleksowy algorytm umożliwiający kalibrację i jednoczesną walidację modeli ruchu. Największą niedogodnością w tym rozwiązaniu był wymóg przetestowania dużej liczby wzorców (1300 wzorców) w programie mikrosymulacyjnym co przekładało się na długi czas pracy. Ponadto odtworzenie tak skomplikowanego algorytmu nie jest proste, dlatego w przeprowadzonych analizach zaproponowano uproszczoną metodę kalibracji wykorzystującą SSN.

2. Budowa modeli ruchu

Budowa mikrosymulacyjnego modelu ruchu (rys. 1) jest procesem czasochłonnym, wymaga zebrania dużej ilości danych o ruchu pojazdów i sieci drogowej. Pierwszy etap budowy modelu zakłada przeniesienie istniejącego układu drogowego do modelu ruchu. Na podstawie podkładów mapowych odzwierciedla się geometrię ulic i skrzyżowań uwzględniając szerokość i liczbę pasów ruchu, promienie łuków skrotnych oraz pochylenia podłużne niwelety. W kolejnym etapie wprowadzona zostaje organizacja ruchu. Definiujemy warunki przejazdu przez skrzyżowania ustalając zasady pierwszeństwa (w przypadku skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej) lub wprowadzamy programy sygnalizacji świetlnej sterującej ruchem na skrzyżowaniu.

W kolejnym kroku wprowadzamy dane z pomiarów ruchu, które uwzględniają natężenie ruchu, strukturę rodzajową i kierunkową. Na tym etapie wprowadzony zostaje między innymi ruch transportu publicznego. Definiuje się linie



Rys. 1. Etapy budowy mikrosymulacyjnych modeli ruchu (opracowanie własne)

Fig.1. Stages of construction microsimulation traffic models

autobusowe i ich marszrutyżacje oraz czasy związane z wymianą pasażerów na przystanku. Ostatnim etapem prac jest kalibracja i walidacja modelu ruchu, który pozwala odwzorować interakcję poszczególnych pojazdów w sieci drogowej. Program komputerowy Vissim w trakcie przeprowadzenia symulacji wykorzystuje dwa modele zachowań kierowców: model jazdy za liderem Wiedemann 74 (zalecany do odzwierciedlenia ruchu miejskiego) lub Wiedemann 99 (zalecany na arteriach miejskich i drogach szybkiego ruchu) oraz model zmiany pasa ruchu. Są to modele zaliczane do grupy modeli empirycznych. W związku z tym muszą być kalibrowane za pomocą kilkunastu parametrów każdorazowo, uwzględniając lokalną specyfikę ruchu.

3. Założenia do kalibracji mikrosymulacyjnego modelu ruchu

Analizę kalibracji przeprowadzono na modelu opracowanym w 2014 r dla al. Okulickiego w Rzeszowie. Jest to odcinek o długości 1280 m, na którym znajduje się 6 skrzyżowań, w tym 2 z sygnalizacją świetlną, które zlokalizowane są na początku i na końcu odcinka. Aleja posiada przekrój dwujezdniowy, cztero-pasowy z szerokim pasem dzielącym jezdnie oraz chodniki i ścieżki rowerowe po obu stronach. Proces budowy modelu i zakres badań ruchu został szczegółowo przedstawiony w jednej z wcześniejszych publikacji [2].

W analizowanym przypadku, do kalibracji modelu ruchu przyjęto średni czas przejazdu na odcinku wynoszący 80 s. Zmienne umożliwiające przeprowadzenie procesu kalibracji zostały przedstawione w tabeli 1. Zakres zmiennych

Tabela 1. Parametry uwzględnione w procesie kalibracji

Table 1. Parameters for calibration process

Nr	Parametr	Minimalna wartość	Maksymalna wartość	Zmiana parametru następuje co:
1	<i>Desired Speed Distribution</i> - prędkość w ruchu niezakłóconym; przyporządkowywana jest pojazdowi z odchyleniem 10% [km/h]	50	80	10
2	<i>Number of Observed Preceding Vehicles</i> – Liczba obserwowanych pojazdów znajdująca się przed poruszającym się pojazdem wpływająca na zachowania kierowcy tego pojazdu [P]	1	4	1
3	<i>Average Standstill Distance</i> - średnia odległość pomiędzy pojazdami stojącymi w kolejce lub od punktów stałych (linie zatrzymań) [m]	1	3	0,5
4	<i>Waiting Time Before Diffusion</i> – czas oczekiwania po którym następuje usunięcie zablokowanego modelu z symulacji [s]	15	60	15
5	<i>Minimum Headway</i> – minimalna odległość przed pojazdem umożliwiającą zmianę pasa ruchu [m]	0,5	6,5	1
6	<i>Safety distance reduction factor</i> – współczynnik redukujący odległość bezpieczeństwa [-]	0,05	0,65	0,1

został wyznaczony na podstawie przeglądu literaturowego [3-6]. Dla przyjętej liczby i zakresu zmiennych należałoby przeanalizować łącznie 15680 kombinacji danych wejściowych. Jednak znalezienie odpowiedniego zestawu parametrów dla zakładanego czasu przejazdu nie jest zadaniem łatwym i dlatego do przyspieszenia tego procesu zaproponowano w niniejszej pracy zastosowanie SSN. Wszystkie symulacje zostały wykonane przy pomocy programów Vissim i Matlab.

Program Vissim umożliwia budowę modeli mikrosymulacyjnych ruchu drogowego. Posiada on także możliwość komunikacji z innymi programami komputerowymi poprzez port COM [7]. Dzięki temu możliwa jest wymiana informacji pomiędzy różnymi programami. W tym celu opracowano skrypt programu Matlab, umożliwiający automatyczne uruchamianie i testowanie modeli ruchu z różnymi ustawieniami. Sama tylko automatyzacja tego procesu znacznie przyspiesza i usprawnia pracę.

4. Budowa sztucznej sieci neuronowej

4.1. Koncepcja wykorzystania SSN

Koncepcja wykorzystania SSN do kalibracji modeli mikrosymulacyjnych polega na zastąpieniu czasochłonnych symulacji w dedykowanych do tego celu programach uprzednio wytrenowaną do tego celu siecią neuronową. Trenowanie SSN wymaga jednak utworzenia początkowej bazy wzorców, które zostaną wykorzystane do uczenia się sieci. Wykorzystując następnie zdolności SSN do generalizacji, możliwe jest bardzo szybkie oszacowanie średnich czasów przejazdu. Dzięki temu możliwe jest szybkie znalezienie zestawu parametrów wejściowych, które odpowiadają zakładanym czasom przejazdu. Walidacja tych parametrów w programie Vissim pokazuje dobrą ich zgodność.

4.2. Wzorce do trenowania SSN

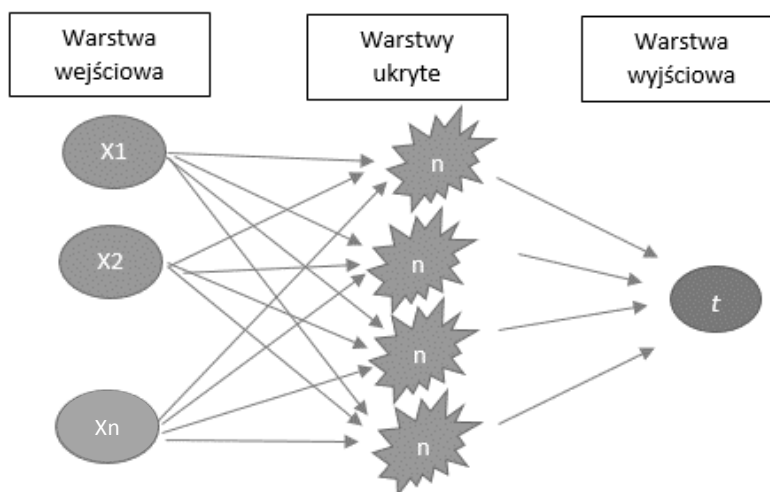
Na potrzeby symulacji wygenerowano w programie Vissim grupę A zawierającą 100 wzorców oraz grupę B zawierającą 50 wzorców. Każdy wzorzec został opracowany zgodnie z założeniami przedstawionymi w tabeli 1 i składał się z sześciu niepowtarzalnych kombinacji parametrów wejściowych. W celu wygenerowania poszczególnych grup wzorców wykorzystano metodę statystyczną Latin Hypercube Sampling (LHS) [8]. LHS pozwala dokonać próbkowania wykorzystując informacje o rozkładzie prawdopodobieństwa danych, przez co wylosowana próbka staje się bardziej reprezentatywna. Wygenerowane w ten sposób zestawy parametrów wejściowych zostały wprowadzone do modelu ruchu al. Okulickiego. Każdy wzorzec podlegał 10 krotnej symulacji uwzględniającej zmianę liczb losowych w symulacji (ang. random seeds). Zmiana parametru 'random seeds', umożliwia między innymi losową generację zgłoszeń pojazdów w przekroju w każdej kolejnej symulacji. Dzięki temu możliwe jest uwzględnie-

nie losowego ruchu pojazdów na analizowanym odcinku. W każdej z symulacji przewidziano 15 min czas początkowy, potrzebny do napełnienia modelu pojazdami i odwzorowaniu warunków ruchu najbliższych do tych, które występowały na początku wyznaczonej godziny szczytu. Po tym okresie rozpoczynał się właściwy pomiar czasu przejazdu. Ostatecznie czasy uzyskane z każdej z 10 symulacji zostały uśrednione dla danego przypadku.

4.3. Trenowanie SSN

Sztuczne sieci neuronowe (rys. 2) w uproszczeniu składają się z następujących warstw:

- warstwy wejściowej, do której podawane są parametry wejściowe (zmienne) modelu,
- warstwy ukrytej, w której znajdują się neurony wytrenowane do rozwiązywania postawionego problemu,
- warstwy wyjściowej, która zwraca oszacowaną odpowiedź układu.



Rys. 2. Uproszczony schemat SSN

Fig. 2. Simplified diagram of SSN

Podczas projektowania architektury SSN należy wyznaczyć liczbę neuronów w warstwie ukrytej, potrzebną do właściwego odwzorowania danych wejściowych w zbiór danych wyjściowych. Proces ten został przeprowadzony doświadczalnie. Należy przy tym pamiętać o problemie nadmiernego dopasowania się sieci do danych uczących [9]. Dlatego też liczba parametrów SSN powinna być mniejsza lub równa liczbie wzorców uczących. Przyjęto zatem szacunkowo, na podstawie maksymalnej liczby parametrów SSN:

$$N = n * (x + y) \quad \text{oraz} \quad N \leq W \quad (1)$$

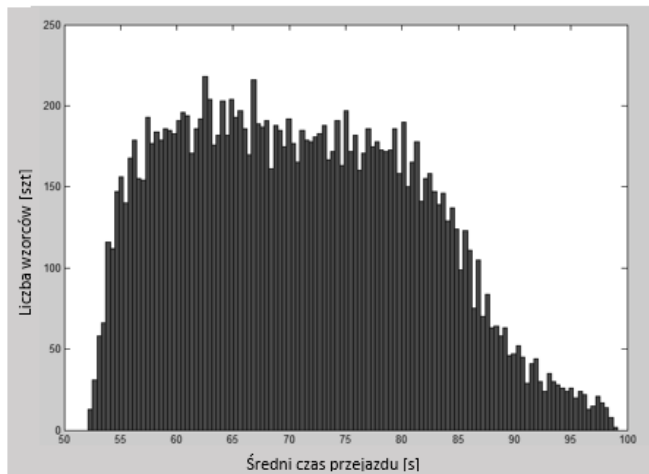
gdzie: N - liczba parametrów SSN,
 x - liczba zmiennych w wektorze wejściowym,
 y - liczba wyjść sieci,
 n - liczba neuronów w warstwie ukrytej,
 W - liczba wzorców użytych do uczenia SSN,

że maksymalna liczba neuronów w warstwie ukrytej w grupie A wynosi 14 neuronów, a w grupie B 7 neuronów.

Trenowanie sieci neuronowej wymaga również zdefiniowania jaka część wzorców uczących zostanie użyta do procesu testowania SSN. W przeprowadzonych analizach liczby wzorców do testowania zmieniała się od 10% do 30%. Przyjęta do symulacji sieć neuronowa posiadała w warstwie ukrytej nieliniową sigmoidalną funkcję aktywacji, a w warstwie wyjściowej funkcję liniową. Dobraną ostatecznie architekturę SSN, odpowiednio dla wzorców z grupy A i B, można zapisać jako 6-10-1 oraz 6-6-1 (liczba wejść – liczba neuronów w warstwie ukrytej – liczba wyjść).

4.4. Kalibracja modelu ruchu przy użyciu SSN

Po ustaleniu architektury SSN przeprowadzono proces jej trenowania. Ponieważ wynik trenowania zależy od początkowo wylosowanych wartości wag, dlatego proces ten powtarzano wielokrotnie, analizując jednocześnie wyniki pod względem najmniejszych średnich błędów uczenia i testowania. Następnie do wytrenowanej sieci podano pozostałe kombinacje parametrów wejściowych (które nie brały udziału w procesie trenowania), aby oszacować dla nich czasy przejazdu. Przykładowy wynik w postaci histogramu uzyskanych wartości przedstawiono na rys. 3.

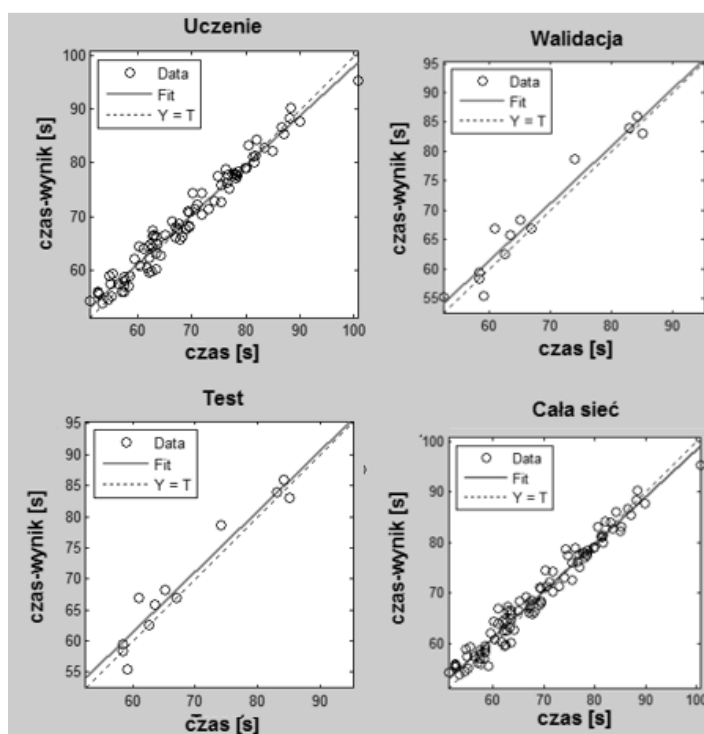


Rys. 3. Histogram średnich czasów podróży wygenerowany przez sieć neuronową (grupa A)

Fig. 3. Histogram of average travel times generated by the neural network (group A)

Na tej podstawie odszukać można te zestawy parametrów wejściowych, które są najbliższe zakładanemu czasowi przejazdu. W kolejnym etapie zostaną one poddane walidacji w programie Vissim.

W grupie A wytrenowano sieć składającą się z 10 neuronów w warstwie ukrytej i 13% udziałem wzorców do testowania i walidacji. Wytrenowana sieć cechowała się 5 s średnim błędem uczenia i testowania oraz wysokim współczynnikiem korelacji $R^2 = 0,98$. Na rysunku 4 można także zauważyć, że wzorce użyte do uczenia zostały równomiernie rozłożone w całym analizowanym przedziale czasu od 50 s do 90 s. Taki rozkład korzystnie wpłynie na dokładność dalszego szacowania czasów przejazdu w tym przedziale.



Rys. 4. Histogram średnich czasów podróży wygenerowany przez sieć neuronową (grupa A)

Fig. 4. Correlation coefficient results for developed networks (group A)

W celu przeprowadzenia walidacji, spośród wszystkich wygenerowanych wzorców (15680) i uzyskanych czasów przejazdu, wyodrębniono te, dla których SSN wygenerowała średni czas przejazdu równy czasowi otrzymanemu podczas pomiarów ruchu. W grupie A liczba wzorców z czasem 80 s ($\pm 1s$) wynosiła 444. Do sprawdzenia sieci wylosowano 5 zestawów parametrów wejściowych i wprowadzono je do programu mikrosymulacyjnego.

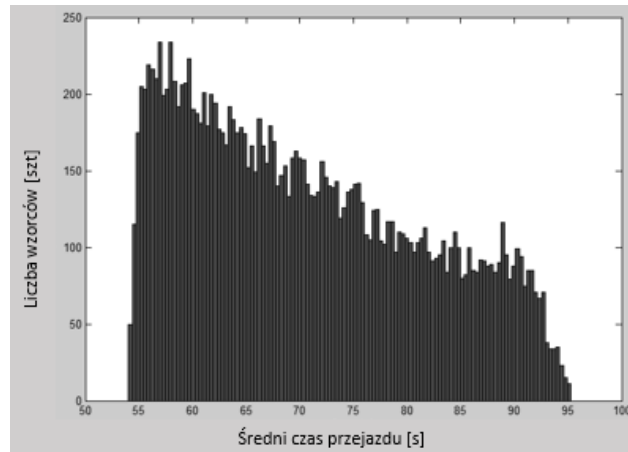
Wyniki przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Porównanie średnich czasów przejazdu wygenerowanych przez SSN i program Vissim - grupa A
Table 2. A comparison of average travel times generated by the SSN and the program VisSim - group A

Parametr /no	Wylosowana grupa wzorców				
	1	2	3	4	5
Prędkość w ruchu niezakłóconym [km/h]	50	60	70	80	50
Liczba obserwowanych pojazdów [szt.]	4	2	4	4	1
średnia odległość pomiędzy pojazdami stojącymi w kolejce [m]	3	2	2	1,5	3
czas oczekiwania po którym następuje usunięcie zab. poj. [s]	30	45	15	30	45
min. odl. przed poj. umożliwiającą zmianę pasa ruchu[m]	1,5	6,5	5,5	5,5	4,5
współczynnik redukujący odległość bezpieczeństwa [-]	0,25	0,65	0,65	0,65	0,15
Średni czas przejazdu wygenerowany przez SSN [s]	80				
Średni czas przejazdu wygenerowany przez Vissim [s]	86	75	76	78	88
Odchylenie standardowe [s]	20	17	16	17	19
Różnica	8%	6%	5%	2%	10%
Średnia długość kolejek uzyskana podczas pomiarów [m]	100				
Średnia długość kolejek wygenerowana przez Vissim [m]	109	75	74	69	127
Różnica	9%	25%	26%	31%	27%

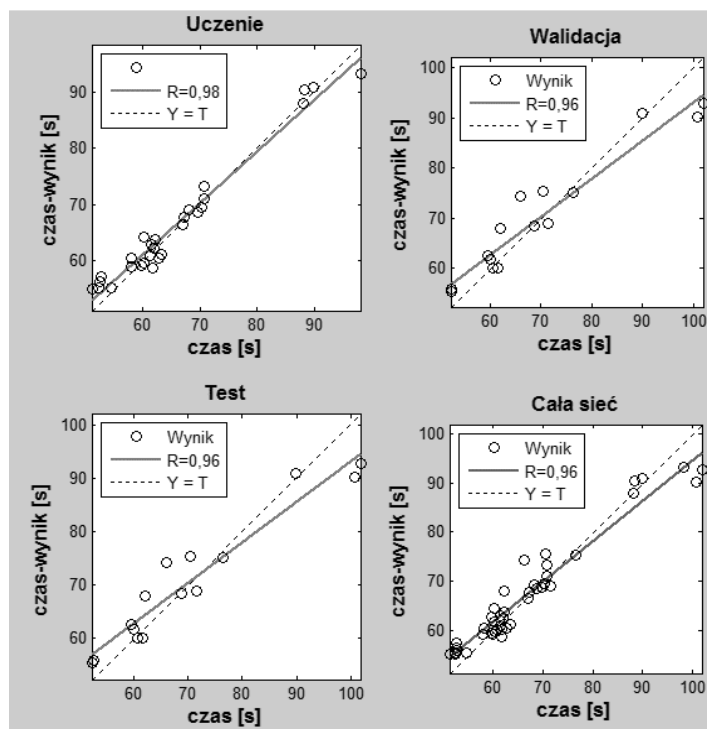
Wszystkie wylosowane wzorce pozwoliły uzyskać zadawalający wynik w modelu ruchu. Różnica średnich czasów przejazdu nie odbiegała więcej niż 10% od wartości pomierzonych w trakcie badań ruchu. Do walidacji modelu wykorzystano średnią długość kolejki, która podczas pomiarów wynosiła 100 m. Z pośród wylosowanych wzorców najlepsze wyniki daje wzorzec 1, gdzie różnica średniego czasu przejazdu wynosi 8% a średnia długość kolejki 9%. Najkorzystniejszy średni czas przejazdu otrzymano z wzorca 4, jednak długość kolejki mocno odbiegała od pomierzonej wartości stąd wykorzystanie tej kombinacji będzie nieuzasadnione.

W grupie B wytrenowano SSN składającą się z 6 neuronów w warstwie ukrytej. Do testowania sieci wykorzystano 28% wzorców. Uzyskana sieć cechowała się średnio 5 s błędem uczenia i średnio 10 s błędem testowania. Na rys. 5 przedstawiono histogram rozkładu wzorców dla poszczególnych czasów, który różni się od poprzedniego (rys. 3). W tym przypadku wygenerowanych zostało znacznie mniej wzorców dla szukanego czasu. Wytrenowana sieć ciągle jednak cechuje się wysokim poziomem korelacji wynoszącym $R^2 = 0,96$.



Rys. 5. Histogram średnich czasów podróży wygenerowany przez sieć neuronową (grupa B)

Fig. 5. Histogram of average travel times generated by the neural network (group B)



Rys. 6. Histogram średnich czasów podróży wygenerowany przez sieć neuronową (grupa B)

Fig. 6. Correlation coefficient results for developed networks (group B)

W przypadku grupy B otrzymany rozkład wzorców uczących w przestrzeni zmiennej wyjścia (rys. 6) nie jest tak równomierny jak poprzednio. Ze względu na ich liczbę, było to trudniejsze do uzyskania algorytmem LHS. Największe zagęszczenie punktów otrzymano w przedziale od 50 s do 75 s. Kolejne punkty uzyskano dopiero powyżej 90 s. Może to bezpośrednio wpływać na dokładność oszacowania czasów przejazdu.

Podobnie jak poprzednio, z całej grupy 15680 wzorców wyodrębniono te, dla których SSN oszacowała średni czas przejazdu równy 80 s. W grupie B liczba wzorców zwracająca czas 80 s (+/- 1s) wynosiła 299. Do sprawdzenia sieci wylosowano 5 i wprowadzono je do programu mikrosymulacyjnego. Wyniki przedstawia tabela 3.

Wylosowane próbki, podobnie jak w poprzedniej grupie, nie różniły się więcej niż o 10% od wartości szukanych czasów. Uwzględniając uzyskane wartości, do dalszych analiz ruchu można wybrany pierwszy wylosowany wzorzec cechujący się 3% różnicą średniego czasu przejazdu i 2% różnicą średniej długości kolejki.

Tabela 3. Porównanie średnich czasów przejazdu wygenerowanych przez SSN i program Vissim -grupa B
Table 3. A comparison of average travel times generated by the SSN and the program VisSim -group B

Parametr \no	Wylosowana grupa wzorców				
	1	2	3	4	5
Prędkość w ruchu niezakłóconym [km/h]	50	60	70	80	50
Liczba obserwowanych pojazdów [szt.]	3	4	2	3	1
średnia odległość pomiędzy pojazdami stojącymi w kolejce [m]	3	2,5	2,5	3	2,5
czas oczekiwania po którym następuje usunięcie zab. poj. [s]	30	60	45	15	30
min.odl.przed poj. umożliwiającą zmianę pasa ruchu[m]	3,5	3,5	4,5	2,5	6,5
współczynnik redukujący odległość bezpieczeństwa [-]	0,15	0,65	0,45	0,45	0,15
Średni czas przejazdu wygenerowany przez SSN [s]	80				
Średni czas przejazdu wygenerowany przez Vissim [s]	82	84	74	78	89
Odchylenie standardowe [s]	24	17	17	18	24
Różnica	3%	5%	7%	2%	10%
Średnia długość kolejek uzyskana podczas pomiarów [m]	100				
Średnia długość kolejek wygenerowana przez Vissim [m]	102	93	82	93	128
Różnica	2%	7%	18%	7%	28%

5. Dyskusja

Wykonane wstępne analizy kalibracji modeli mikrosymulacyjnych przy użyciu SSN, pokazały duży potencjał tej metody. Należy jednak zauważyć, że badania przeprowadzono na prostym modelu ruchu, w którym procesowi kalibracji podlegał tylko jeden średni czas przejazdu. Bardziej rozbudowane modele mogą wymagać przeprowadzenia jednoczesnej kalibracji kilku parametrów np. średniego czasu przejazdu w transporcie publicznym i średniego czasu przejazdu w transporcie indywidualnym. W przypadku uwzględnienia transportu publicznego w modelu zwiększy się zakres zmiennych wchodzących w skład wzorca (z sześciu do siedmiu). Dodatkowa zmienna, której zakres będzie zmieniać się w zakresie 3 wartości, potroi liczbę możliwych kombinacji co w istotny sposób wpłynie na czas potrzebny do analizy danych. Zaproponowane użycie metody Latin Hypercube Sampling, pozwoliło uzyskać na tyle szeroki przedział wyników średnich czasów, aby umożliwić efektywne wytrenowanie SSN. W przypadku prostych modeli, zadawalające efekty można uzyskać przy niewielkiej liczbie próbek. Jak zauważono, wylosowane w grupie A i B wzorce pozwoliły otrzymać równie dobre wyniki. Wygenerowana grupa 50 wzorców pozwoliła uzyskać rozkład wyników w zakresie od 50 do 100 s, przy czym największe zagęszczenie wyników otrzymano w zakresie od 50 s do 70 s. Przyjęcie mniejszej liczby początkowej wzorców mogłoby wpłynąć niekorzystnie na poszukiwaną wartość czasu. Dlatego podczas stosowania tej metody proponuje się wygenerowanie wstępnej liczby wzorców (50 szt.), która może być zwiększana.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wstępne wyniki dotyczące kalibracji modeli mikrosymulacyjnych przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych. Uproszczona metoda kalibracji zakłada zastosowanie następującej procedury:

1. Wygenerowanie początkowej bazy wzorców przy użyciu LHS,
2. Wytrenowanie SSN,
3. Wygenerowanie wszystkich możliwych kombinacji parametrów zwracających poszukiwaną wartość średniego czasu przejazdu,
4. Wybór ostatecznego zestawu zmiennych na podstawie walidacji.

Przedstawiona metoda kalibracji zakłada użycie Latin Hypercube Sampling w celu wygenerowania początkowej kombinacji wzorców, które zostaną wykorzystane do trenowania SSN. Sztuczna sieć neuronowa zostaje utworzona przez użytkownika metodą eksperymentalną, w której analizowane są najważniejsze parametry sieci tj.: średni błąd uczenia, średni błąd testowania, współczynnik korelacji oraz histogram czasów przejazdu. Jak pokazało przeprowadzone doświadczenie, minimalna liczba początkowa wzorców powinna być dobierana w zależności od stopnia skomplikowania modelu. Sugerowana przez autora początkowa grupa wzorców powinna wynosić co najmniej 50 szt., która w przy-

padku otrzymywania słabych wyników z sieci powinna być zwiększana. Kalibracja modelu została wykonana w oparciu o średnie czasy przejazdu na odcinku al. Okulickiego w Rzeszowie a walidacja otrzymanych wyników związana była ze średnią długością kolejek tworzących się na końcu analizowanego odcinka. Wstępne analizy pokazały, że zaprezentowana metoda może z sukcesem posłużyć do kalibracji prostych modeli mikrosymulacyjnych ruchu drogowego.

Literatura

- [1] I. Otkovic, T. Tollazzi, M. Šraml: Calibration of microsimulation traffic model using neural network approach, *Expert Systems with Applications* 40 (2013) 5965-5974, Elsevier.
- [2] Szarata M., Olszewski P.: Analiza efektywności dynamicznie wydzielanego pasa autobusowego, 60 Konferencja PAN i PZiTb Krynica 2014, materiały pokonferencyjne Zeszyty Naukowe Politechniki Lubelskiej Budownictwo i Architektura vol. 13(4), 2014.
- [3] Podręcznik użytkownika Vissim 5.2. PTV Vision 2009.
- [4] Byungkyu Park, J.D. Schneeberger: Microscopic Simulation Model Calibration and Validation, *Transportation Research Record* 1856, Paper No. 03-2531.
- [5] T. Dybicz: Odwzorowanie fenomenu dwóch przepustowości w mikrosymulacyjnym modelu ruchu w programie Vissim, *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, Oddział w Krakowie* 2014, s 41-55.
- [6] R. Dowling, A. Skabardonis, V. Alexiadis: *Traffic Analysis Toolbox Volume*.
- [7] Instrukcja firmy PTV Vision: Introduction to the COM API, Karlsruhe Germany 2015.
- [8] A. Gramacki, J. Gramacki: Redukcja licznosci zbiorów z wykorzystaniem systemu R, Konferencja PLOUG 2011.
- [9] Waszczyszyn, Z. & Ziemiański, Neural networks in the identification analysis of structural mechanics problems, L. Mroz, Z. & Stavroulakis, G.E. (ed.) *Parameter Identification of Materials and Structures*, Springer – Wien, 2005, 265-340.

ANALYSIS OF THE USE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO CALIBRATION OF MICROSIMULATION TRAFFIC MODEL

Summary

Computer traffic models are widely used for analysis of the capacity and efficiency of road network. Construction of traffic models is a long and complex process. One of the most time-consuming stages of the calibration model, which aim is to reflect real traffic condition. This process can be greatly accelerated by the use of artificial neural networks to generate potentially best combinations of parameters for the traffic model. The paper presents a method of building neural networks for traffic modeling, and proposes a procedure for the calibration process.

Keywords: Calibration of microsimulation traffic models , artificial neural networks, the construction of microsimulation traffic model, traffic engineering

Przesłano do redakcji: 6.03.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Ryszard OKOŃSKI¹
Rafał PASELA²

WPLYW ZASTOSOWANIA W CHŁODNICTWIE FLUOROWANYCH GAZÓW CIEPLARNIANYCH NA GLOBALNE OCIEPLENIE KLIMATU

Zmiany klimatu na Ziemi w przeciągu wieków wywołane były różnymi przyczynami. Najistotniejsze z nich, między innymi, dotyczyły efektu cieplarnianego, wybuchu wulkanów o co za tym idzie emisji gazów (dwutlenku węgla, tlenki azotu, metan i innych) do atmosfery. Rozwój przemysłu spowodował większe stosowanie gazów w chłodnictwie początkowo zawierających chlor a obecnie F-gazów zawierający fluor. Dotyczy to wszystkich urządzeń chłodniczych w naszych domach. Wpływ tych gazów z grupy HCFH czy F-gazów jest różny na niszczenie warstwy ozonowej wokół Ziemi co z kolei wpływa na efekt cieplarniany a co za tym idzie na globalne ocieplenie.

Słowa kluczowe: klimat, globalne ocieplenie, efekt cieplarniany, F-gazy

1. Wprowadzenie

Klimat na ziemi w okresie historycznym zmieniał się wielokrotnie. Ziemia wiele razy przechodziła długie okresy zlodowacenia a następnie stosunkowo krótkie ocieplenia. Klimat jest efektem oddziaływania powierzchni Ziemi i atmosfery czyli gazowej powłoki wokół niej. Początek drugiego tysiąclecia był ciepły gdyż temperatura była o pół stopnia większa niż obecnie. W następnych wiekach nastąpiło ponowne ochłodzenie i dopiero od początku XIX wieku nastąpiło stopniowe podwyższanie temperatury obserwowane do czasów obecnych. Przyczynami tych zmian są między innymi efekt cieplarniany, efekt aerologiczny, wybuchy wulkanów czy zmiany ozonosferze. Wszystkie te zjawiska wpływają na globalne ocieplenie klimatu na Ziemi [1].

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Ryszard Okoński, Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Inżynierii Sanitarnej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-794 Bydgoszcz, rysoko@utp.edu.pl

² Rafał Pasela, Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Inżynierii Sanitarnej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-794 Bydgoszcz, rafal.pasela@utp.edu.pl

2. Przyczyny zmian klimatu

Problem zmiany klimatu został zauważony przez Narody Świata, które w Nowym Jorku w roku 1992 podpisały Ramową Konwencję Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu [5].

Strony tej konwencji, uznały, że zmiany klimatu Ziemi i ich negatywne skutki są wspólnym problemem ludzkości. Wskutek działalności człowieka poważnie zwiększyła się ilość gazów cieplarnianych, że wzrost ich ilości intensyfikuje naturalny efekt cieplarniany i że rezultatem tego będzie wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi i atmosfery. Głównymi przyczynami zmian klimatu są:

- efekt cieplarniany,
- efekt aerozolowy (bezpośredni i pośredni),
- wybuchy wulkanów,
- zmienność aktywności Słońca,
- zmiany w ozonosferze.

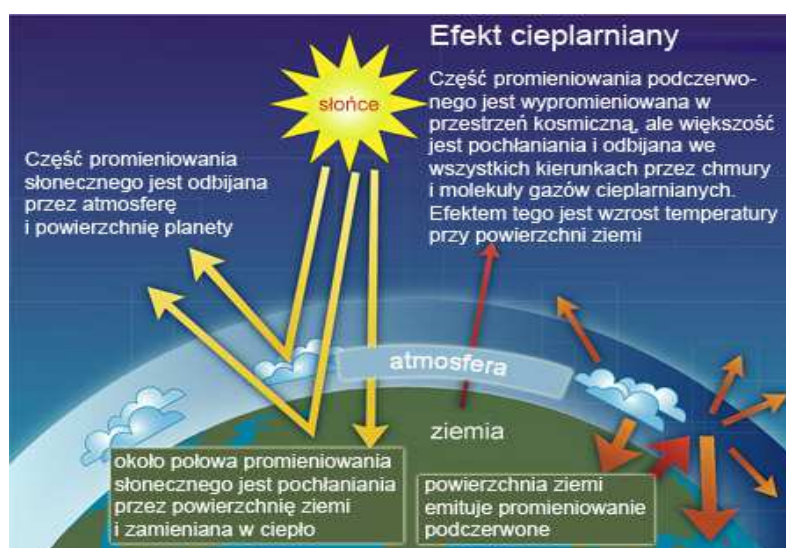
Może to wpłynąć negatywnie na naturalne ekosystemy i ludzkość, biorąc pod uwagę, że największy udział w dawnych i obecnych globalnych emisjach gazów cieplarnianych przypada na państwa wysoko rozwinięte. Emisja tych gazów w przeliczeniu na jednego mieszkańca w państwach rozwijających się jest wciąż względnie niewielka i że udział tych państw w globalnych emisjach gazów będzie wzrastał w związku z potrzebą społecznego i gospodarczego rozwoju tych państw. Aby ograniczyć grożące ryzyko zmian klimatycznych, kraje uprzemysłowione uzgodniły ograniczenie emisji gazów cieplarnianych o 80-95% do roku 2050 [4].

3. Czym są gazy cieplarniane tzw F-gazy

Gazy cieplarniane to sterujący klimatem czynnik na który człowiek ma największy wpływ. W jaki sposób podnoszą one temperaturę Ziemi? Światło Słońca przenika w znacznej mierze przez atmosferę i dociera do powierzchni naszej planety. Część odbija się i ucieka z powrotem w kosmos. Większość jest jednak pochłaniana przez Ziemię. Jej ogrzana dzięki temu powierzchnia sama zaczyna emitować promieniowanie, „świecić”, jednak już nie w świetle widzialnym, lecz w (dalekiej) podczerwieni. Promieniowanie to jest zatrzymywane przez gazy cieplarniane obecne w atmosferze, które choć przepuszczają światło słoneczne, to jednak absorbują podczerwień, powoli podnosząc temperaturę. Ciepła atmosfera sama zaczyna „świecić” w podczerwieni we wszystkich kierunkach. Część tego promieniowania ucieka w kosmos (widzimy je np., w codziennej prognozie pogody, oglądając obrazy satelitarne pokrywy chmur), a część jest pochłaniana przez powierzchnię planety. Jest to „promieniowanie zwrotne” atmosfery. Opisany mechanizm to nic innego jak tzw. **efekt cieplarniany**, wywoływany przez gazy takie jak dwutlenek węgla (CO_2), metan (CH_4), tlenek azotu (N_2O) i parę wodną [3].

4. Efekt cieplarniany

Szczególne znaczenie mają tak zwane gazy cieplarniane, bez których życie na Ziemi byłoby niemożliwe. Są to występujące w atmosferze w śladowej ilości: para wodna, dwutlenek węgla, tlenek azotu, metan i ozon. Ich działanie nazwane efektem cieplarnianym (rys. 1) jest zjawiskiem naturalnym i korzystnym, umożliwiającym rozwój życia na Ziemi. Polega on na tym, że gazy cieplarniane przepuszczają do powierzchni Ziemi znaczną część promieniowania słonecznego, a jednocześnie nie dopuszczają do wypromieniowania ciepła w przestrzeń kosmiczną. To dzięki nim średnia temperatura roczna najniższych warstw atmosfery wynosi obecnie ok. 15,5°C. Bez gazów cieplarnianych w atmosferze temperatura ta wynosiłaby około -18°C, co spowodowałoby pokrycie lodem całej powierzchni Ziemi. Panowałyby warunki, w których życie w obecnej formie nie mogłoby istnieć. Znaczną ilość gazów cieplarnianych produkuje biosfera, jednak problem ocieplenia globalnego, jakie obserwujemy obecnie, wynika w dużej mierze także z gospodarczej działalności człowieka, powodującej emisję do atmosfery dodatkowej porcji gazów cieplarnianych [2].



Rys. 1. Ogólny schemat efektu cieplarnianego

Fig. 1. A general scheme of the greenhouse effect

Głównym ich źródłem jest spalanie węgla kopalnych (kamiennego i brunatnego) oraz ropy naftowej i gazu ziemnego. Ponadto wytwarzane sztucznie freony i halony wpływają niszcząco na ozon – gaz, którego obecność w stratosferze daje ochronę powierzchni Ziemi przed szkodliwymi składnikami promieniowania słonecznego UV (problem „dziury ozonowej”) [2].

5. Powszechnie zastosowanie F-gazów

Rodzina F-gazów obejmuje wodorofluorowęglowodory (HFC), perfluorowodory (PFC) i heksafluoreksyarki (SF_6). Znajdują zastosowanie głównie w lodówkach domowych, sklepowych oraz chłodniach stacjonarnych jak i ruchomych. W instalacjach klimatyzacyjnych obsługujących obiekty budowlane. Można je również spotkać jako środki porotwórcze w piankach izolacyjnych termicznych. Oparte na węglowodorze gazy HFC i PFC zawierają atomy fluoru, które zapewniają im wyjątkowe właściwości. Spotkać je można jako rozpuszczalniki w procesie czyszczenia precyzyjnego, bezwonne środki gaśnicze, propelenty w preparatach aerozolowych [4].

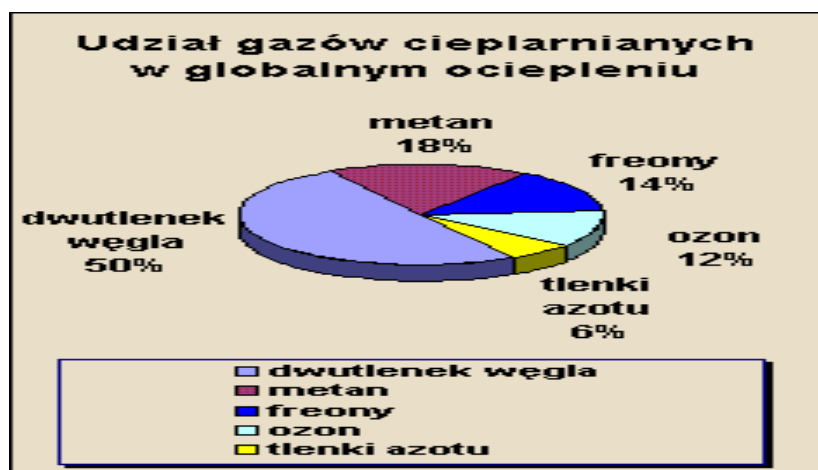
6. Wpływ gazów cieplarnianych na globalne ocieplenie

Parlament Europejski wcześniej rozpoznał negatywny wpływ F-gazów i już w 2006 r. wydał odpowiednie, ograniczające rozporządzenie (WE nr 842/2006). Z dniem 01.01.2015 r. zostało ono zastąpione nowym Rozporządzeniem (UE) nr 517/2014, które znacznie zaostrza wymogi w przedmiotowym zakresie [4].

Nowe rozporządzenie ponownie wprowadza jeszcze większą redukcję emisji gazów F. Gazy F obejmują praktycznie wszystkie aktualnie powszechnie stosowane czynniki chłodnicze do urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych. Zastosowanie niektórych z tych czynników chłodniczych zostanie bezpośrednio zabronione w określonych terminach, koszt innych znacznie się zwiększy w wyniku „phase down” (limit dopuszczony do obrotu) [4].

Różne właściwości gazów cieplarnianych (m.in. to, jaką część promieniowania podczerwonego absorbują) sprawia, że ich wpływ na podnoszenie się temperatury Ziemi jest różny i nie zależy od stopnia ich stężenia w atmosferze (rys. 2). W przybliżeniu można przyjąć, że za 75% efektu cieplarnianego odpowiada para wodna (wraz z chmurami). Wpływ dwutlenku węgla to 20%, a pozostałych gazów cieplarnianych łącznie to około 5%. Jak zatem widać, wpływ pary wodnej jest słabszy niż wskazywałby na to jej udział w atmosferze (90% cząstek gazów cieplarnianych). Pozostaje ona skupiona blisko powierzchni Ziemi, podczas gdy dla całości efektu cieplarnianego ważna jest zawartość gazu we wszystkich warstwach atmosfery [3].

Niekorzystne oddziaływanie czynnika chłodniczego w przypadku jego uwolnienia do środowiska odzwierciedla tzw. wartość GWP (potencjał tworzenia efektu cieplarnianego). Wartość ta informuje, ilekroć gorsze jest oddziaływanie emisji czynnika chłodniczego w porównaniu z emisją jednego kilograma CO_2 . Przykład: jeżeli wartość GWP czynnika chłodniczego wynosi 1490, oznacza to, że wpływ uwolnienia jednego kilograma tego czynnika do atmosfery jest 1490 razy gorszy od wpływu tej samej uwolnionej ilości CO_2 [4].



Rys. 2. Udział gazów cieplarnianych w globalnym ociepleniu

Fig. 2. The share of greenhouse gases in global warming

Dwutlenek węgla pozostaje gazem, którego emisja jest najsilniej powiązana z aktywnością człowieka. Rocznie, wskutek samego spalania paliw kopalnych produkujemy ok. 35 mld ton CO₂ (rys. 3) co odpowiada blisko 10 mld. ton pierwiastka węgla rocznie. Prawie połowa naszych emisji jest pochłaniana przez oceany i lądy. Reszta gromadzi się jednak w atmosferze [6].



Rys. 3. Zmiany emisji dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych w okresie 1751-2012

Rys. 3. Changes in carbon dioxide emissions from the burning of fossil fuels in the period 1751-2012

Od końca lat 50-tych XX wieku (od kiedy prowadzony jest systematyczny i bardzo dokładny monitoring zawartość atmosferycznego CO₂) koncentracja tego gazu w atmosferze wzrosła z poziomu 315 ppm (cząstek na milion cząsteczek powietrza) do 398 ppm w 2013 roku (9 maja odnotowano nawet koncentrację 400ppm). Ze wzrostem spalania paliw kopalnych wzrost koncentracji CO₂ w powietrzu przyspiesza: obecnie co roku rośnie o 2 cząsteczki na milion, jeśli tempo wzrostu CO₂ pozostanie niezmienione ok. 2040 roku osiągniemy 450 ppm. W wielu przypadkach zastosowanie F-gazów oznacza ograniczenie emisji CO₂ wynikającej ze zużycia energii [7].

7. Podsumowanie

Na wysokości 20-35 km na powierzchnią Ziemi rozciąga się strefa podwyższonego ozonu czyli O₃ tzw. warstwa ozonowa. Ozon jako substancja chemiczna przy bezpośrednim działaniu jest szkodliwy dla organizmów żywych. Mimo to stanowi element bez którego życie byłoby niemożliwe. Gaz ten ma zdolność pochłaniania wysokoenergetycznej części widma promieniowania słonecznego w granicy ultrafioletu. Ultrafiolet zaś jest zabójczy dla organizmów żywych, powoduje zniszczenie komórek genetycznych i prowadzi do powstania nowotworów. W początkach XX w zaczęto w chłodnictwie używać związki chlorowco- i fluorowcopochodne węglowodorów zwane freonami. Te lekkie gazy bez trudu dostawały się w wyższe partie atmosfery aż do warstwy ozonowej. Tam pod wpływem silnego promieniowania ultrafioletowego rozkładają się na pierwiastki składowe węgiel, chlor i fluor. Z tych substancji dla ozonu najgorszy jest chlor, który powoduje redukcję ozonu do tlenu. W ten sposób przyczynia się do redukcji warstwy ozonowej w stratosferze [2].

Nawet gdyby dziś udało się powstrzymać emisję gazów cieplarnianych do atmosfery to ich działanie przyspieszające globalne ocieplenie miałyby miejsce jeszcze przez kilka stuleci. Nasilenie się ostatnio ekstremalnych zjawisk pogodowych na całym świecie świadczy o rozkręceniu się całej tej spirali, której nie da się już zatrzymać.

Literatura

- [1] Markiewicz K.: Badania zmian klimatu Ziemi. Naukaoklimacie.pl, dostęp 06-2016.
- [2] Madeyska T., Marks L.: Zmiany klimatu. Jakie były, jakie są i co nam przyniosą. Polska Akademia Nauk, Warszawa 2008 r.
- [3] Prof. Malinowski S., Popkiewicz M.: Czy i dlaczego klimat Ziemi się zmienia. Naukaoklimacie.pl, dostęp 06-2016.
- [4] Rozporządzenie F-gazowe (UE) nr 517/2014 z 16 kwietnia 2014 r.
- [5] Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian klimatu, Nowy Jork, 9 maj 1992 r.

[6] <http://www.klimatdlaziem.pl> Efekt cieplarniany-zrozumieć zjawisko i jego następstwa, dostęp 06-2016.

[7] <http://meteorologiaonline.republika.pl/> Globalne zmiany klimatu, dostęp 06-2016.

IMPACT REFRIGERATION APPLICATIONS FLUORINATED GREENHOUSE GASES IN GLOBAL WARMING CLIMATE

S u m m a r y

Changes in the Earth's climate over the centuries were caused by different causes. The most important of them, among other things, related to the greenhouse effect, the explosion of volcanoes as a result of greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, methane and others) into the atmosphere. The development of industry led to increased use of gas in refrigeration initially containing chlorine and now F-gases containing fluorine. The impact of these gases from the group HCFH or F-gases is different to the destruction of the ozone layer around the Earth, which in turn influences the greenhouse effect and hence global warming.

Keywords: climate, global warming, greenhouse effect, F-gases

Przesłano do redakcji: 30.01.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Marcin KACZMARZYK¹

WPŁYW WSPÓŁCZYNNIKA KSZTAŁTU A/V NA WIELKOŚĆ STRAT CIEPŁA W BUDYNKU W ŚWIETLE ROSNĄCYCH WYMOGÓW DOTYCZĄCYCH IZOLACYJNOŚCI TERMICZNEJ PRZEGRÓD BUDOWLANYCH

Celem niniejszego artykułu było określenie jaki faktyczny wpływ na wielkość sezonowych strat ciepła przez obudowę termiczną budynku miało kiedyś i może mieć obecnie zachowanie zwartej bryły budynku. W artykule przybliżono pojęcia izolacyjności termicznej i współczynnika przenikania ciepła przegród budowlanych. Przedstawiono tu także krajowe wymogi dotyczące izolacyjności termicznej przegród budowlanych, jakie obowiązywały w minionych dekadach, jakie obowiązują obecnie i te, które będą stawiane wobec przegród budowlanych w najbliższych latach. Wyjaśniono także, czym dla budynku jest współczynnik kształtu A/V i powód, dla którego kształt bryły budynku może wpływać na jego charakterystykę energetyczną.

Zaprezentowano wnioski sformułowane przez innych autorów, których prace dotyczą optymalizacji kształtu bryły budynku pod względem cieplnym. Przytoczono również krytyczne opinie dotyczące wpływu takiej optymalizacji kształtu na atrakcyjność architektury obiektów budowlanych. Metodę badawczą oparto na obliczeniach sezonowych strat ciepła w budynkach o różnych stosunkach powierzchni przegród zewnętrznych do kubatury budynku A/V.

Obliczenia przeprowadzono dla 27 modeli budynków o identycznej powierzchni wewnętrznej i kubaturze wewnętrznej, lecz różniących się proporcjami wymiarów i liczbą kondygnacji. W obliczeniach wzięto pod uwagę dziewięć zestawów wartości współczynników przenikania ciepła przegród zewnętrznych, odpowiadających dawnym, aktualnym i przyszłym wymogom krajowym. Różnice w wartościach sezonowych strat ciepła uzyskane dla każdego z zestawów zinterpretowano jako potencjalne oszczędności energetyczne, wynikające z zachowania zwartej bryły budynku i ograniczenia wartości współczynnika kształtu A/V. Wyniki zestawiono i na ich podstawie sformułowano stosowne wnioski.

Słowa kluczowe: współczynnik kształtu A/V, izolacyjność termiczna, straty ciepła, obudowa termiczna budynku

1. Wstęp

Izolacyjność termiczna przegrody budowlanej określa zdolność tej przegrody do spowalniania przepływu ciepła między dwoma środowiskami oddzielo-

¹ Marcin Kaczmarzyk, Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651026; kacmar@prz.edu.pl

nymi rozpatrywaną przegrodą. Wielkością charakteryzującą izolacyjność termiczną konkretnego materiału jest współczynnik przewodzenia ciepła λ wyrażany w [W/m·K]. Znajomość wartości współczynnika λ i grubości warstwy materiału umożliwia obliczenie oporu cieplnego tej warstwy [1]:

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (1)$$

gdzie: R_i – opór cieplny warstwy materiału [$m^2 \cdot K/W$],

d_i – grubość warstwy [m],

λ_i – współczynnik przewodzenia ciepła materiału [W/m·K].

Dzięki znajomości budowy całej przegrody budowlanej, możliwe jest obliczenie wartości jej współczynnika przenikania ciepła:

$$U = \frac{1}{R_{s1} + \sum R_i + R_{s2}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (2)$$

gdzie: U – współczynnik przenikania ciepła całej przegrody [W/m²·K],

R_i – opór cieplny i-tej warstwy materiału wchodzącej w skład przegrody [$m^2 \cdot K/W$],

R_{s1} , R_{s2} – opory przejmowania ciepła między przegrodą i obu środowiskami [$m^2 \cdot K/W$].

Wartość współczynnika przenikania ciepła odpowiada gęstości strumienia ciepła, przepływającego przez daną przegrodę przy jednostkowej różnicy temperatur między środowiskami rozdzielonymi przegrodą, przy założeniu jednowymiarowego przepływu ciepła w warunkach stacjonarnych [2].

Od ponad sześćdziesięciu lat, maksymalne dopuszczalne wartości współczynnika U są regulowane przez obligatoryjne krajowe normy i rozporządzenia.

Historię zmian krajowych wymogów dotyczących izolacyjności termicznej wybranych przegród budowlanych prezentują tabele 1 i 2.

Wartość współczynnika przenikania ciepła jest miarą izolacyjności termicznej tej przegrody.

Izolacyjność termiczna przegród budowlanych to jeden z najważniejszych czynników decydujących o sezonowym zapotrzebowaniu energetycznym budynku [4]. Z tego powodu przegrody budowlane nowoczesnych budynków pasywnych i niskoenergetycznych odznaczają się bardzo niskimi wartościami współczynników przenikania ciepła.

Innym czynnikiem mogącym mieć wpływ na wielkość strat ciepła jest zwartość bryły budynku, opisywana pośrednio za pomocą współczynnika kształtu A/V , czyli stosunku powierzchni obudowy termicznej budynku i kubatury jego przestrzeni ogrzewanej [5] [6].

Tabela 1. Maksymalne dopuszczalne wartości współczynników przenikania ciepła – obligatoryjne normy krajowe [3]

Table 1. Maximum permissible values of heat transfer coefficients - polish building codes [3]

Przegroda	PN-57/ B-02405	PN-64/ B-03404	PN-74/ B-03404	PN-82/ B-02020	PN-91/ B-02020
ściany zewnętrzne	1,16-1,42	1,16-1,42	1,16-1,42	0,75	0,55-0,70
dachy i stropodachy	0,87	0,87	0,7	0,45	0,3
podłogi na gruncie	b/w	b/w	b/w	b/w	b/w
stropy pod nieogrzewanymi poddaszami	1,04-1,16	1,04-1,16	0,93	0,4	0,3
stropy nad nieogrzewanymi piwnicami	1,16	1,16	1,16	1,16	0,6
okna	b/w	b/w	b/w	2,00-2,60	2,00-2,60
drzwi zewnętrzne	b/w	b/w	b/w	2,6	2,6

Tabela 2. Maksymalne dopuszczalne wartości współczynników przenikania ciepła –krajowe rozporządzenia [3]

Table 2. Maximum permissible values of heat transfer coefficients - polish executive orders [3]

Przegroda	Dz. U. 2002 Nr 75 poz. 690	Dz. U. 2008 Nr 201 poz. 1238	Dz. U. 2013 poz. 926 od 2014	Dz. U. 2013 poz. 926 od 2017	Dz. U. 2013 poz. 926 od 2021
ściany zewnętrzne	0,30-0,50	0,3	0,25	0,23	0,2
dachy i stropodachy	0,3	0,25	0,2	0,18	0,15
podłogi na gruncie	b/w	0,45	0,3		
stropy pod nieogrzewanymi poddaszami	0,3	0,25	0,2	0,18	0,15
stropy nad nieogrzewanymi piwnicami	0,6	0,45	0,25	0,25	0,25
okna	2,00-2,60	1,70-1,80	1,3	1,1	0,9
drzwi zewnętrzne	2,6	2,6	1,7	1,5	1,3

Na etapie projektowania budynku o zadanej powierzchni wewnętrznej lub kubaturze, bryłę budynku można kształtować w dość szerokim zakresie i przedstawić bardzo liczne koncepcje [7], różniące się liczbą kondygnacji, kształtem dachu czy obecnością różnych ciekawych rozwiązań architektonicznych, takich jak wykusze, ryzality czy loggie.

Wymienione wyżej czynniki znacząco wpływają na wielkość powierzchni przegród zewnętrznych budynku, a co za tym idzie mogą przyczynić się do redukcji lub do rozwinięcia powierzchni wymiany ciepła ze środowiskiem zewnętrznym, co bezpośrednio przekłada się na wielkość strat ciepła przez obudowę budynku [8]. Poza minimalizowaniem powierzchni obudowy termicznej, zwarta bryła budynku redukuje także całkowite długości krawędzi stanowiących liniowe mostki cieplne.

Liczni autorzy [9] [10] [11] [12] [13] zwracają uwagę na konieczność zachowania zwartej bryły budynku i uzyskania możliwie niskiego współczynnika

kształtu, celem ograniczenia powierzchni przegród zewnętrznych i w konsekwencji redukcji strat ciepła w budynku.

Inni zwracają uwagę na fakt, że budynki o prostych, zwartych bryłach są mało atrakcyjne architektoniczne i wskazują oni na konieczność zachowania kompromisu między względami energooszczędnymi i walorami estetycznymi budynku [8] [14].

2. Cel

Celem niniejszego artykułu jest sprawdzenie potencjalnych oszczędności energetycznych mogących wynikać z zachowania zwartej bryły budynku i redukcji wartości współczynnika kształtu przy zastosowaniu przegród budowlanych znacznie różniących się izolacyjnością termiczną.

3. Metoda badawcza

Przyjęta metoda badawcza polega na obliczeniu i porównaniu wartości sezonowych strat ciepła przez obudowę termiczną modeli budynków o identycznej kubaturze, lecz różniących się zauważalnie wartościami współczynników kształtu.

Do obliczeń przyjęto prostopadłościenną budynki o całkowitej powierzchni wewnętrznej wszystkich kondygnacji 250 m^2 i wewnętrznej kubaturze 650 m^3 . W obliczeniach uwzględniono obecność drzwi i okien w rozpatrywanych budynkach, a ich powierzchnię dobrano tak aby, spełniała aktualnie obowiązujące warunki techniczne. Ponieważ nie dokonywano podziału wnętrza modeli na pomieszczenia, to przyjęto, że całkowita powierzchnia przeszkleń wynosi tu $1/8$ całkowitej powierzchni wewnętrznej wszystkich kondygnacji.

Obliczenia przeprowadzono dla dziewięciu grup izolacyjności termicznej budynków, reprezentowanych dalej przez rok wydania lub początku obowiązywania danych wymogów. W każdej z grup, współczynniki przenikania ciepła przegród budowlanych odpowiadały dokładnie maksymalnym dopuszczalnym wartościom jak w tab. 1 oraz tab. 2.

Przypadku braku sprecyzowanych wymogów wobec wartości U_{\max} dla którejś z przegród, do obliczeń przyjmowano wartości współczynnika U odpowiadające typowym rozwiązaniom stosowanym w danym okresie.

W każdej z grup izolacyjności przeanalizowano 27 budynków o identycznej całkowitej powierzchni wewnętrznej kondygnacji i wewnętrznej kubaturze różniących się liczbą kondygnacji (od 1 do 3) oraz stosunkiem wewnętrznych wymiarów rzutu l/d (od 1:1 do 1:3). W rezultacie otrzymano zakres wartości współczynników kształtu A/V od 0,83 do 1,26 [m^2/m^3].

Przyjęto, że wszystkie analizowane budynki posiadają ściany dwuwarstwowe oraz ciągłą izolację termiczną na całej powierzchni obudowy termicznej. Umożliwiło to wyeliminowanie wpływu udoskonalających się z czasem rozwiązań montażowych na otrzymane wyniki.

We wszystkich budynkach zastosowano te same konstrukcje ścian zewnętrznych, stropodachów i podłóg na gruncie.

Przy obliczaniu powierzchni przegród zewnętrznych wzięto pod uwagę zróżnicowaną grubość przegród budowlanych, która zauważalnie wzrasta wraz z ich izolacyjnością termiczną.

Przykładowo, całkowitą grubość ściany dwuwarstwowej dla konkretnej grupy izolacyjności termicznej obliczono wg wzoru:

$$d_s = d_m + d_t + \lambda_i \cdot \left(\frac{1}{U_s} - R_t - R_m - R_{si} - R_{se} \right) [m] \quad (3)$$

gdzie: U_s – współczynnik przenikania ciepła ściany [$W/m^2 \cdot K$],

d_s – całkowita grubość ściany [m]

R_t – opór cieplny tynków [$m^2 \cdot K/W$],

R_m – opór cieplny muru [$m^2 \cdot K/W$],

λ_i – wsp. przewodzenia ciepła materiału termoizolacyjnego – zawsze 0,04 $W/m \cdot K$,

R_{si}, R_{se} – opory przyjmowania ciepła [$m^2 \cdot K/W$],

Sezonowe straty ciepła przez obudowę termiczną budynku obliczono zgodnie z [15] wg wzoru:

$$Q_{te} = \left(\left(\sum_i (A_i \cdot U_i \cdot b_{TRi}) + \sum_j (l_j \cdot \Psi_j \cdot b_{Tij}) \right) \cdot S_{TH} \right) [kWh] \quad (4)$$

gdzie: A_i – powierzchnia elementu obudowy termicznej budynku [m^2],

U_i – współczynnik przenikania ciepła elementu obudowy termicznej [$W/m^2 \cdot K$],

l_j – długość liniowego mostka cieplnego [m],

Ψ_j – współczynnik przenikania ciepła liniowego mostka cieplnego [$W/m \cdot K$],

b_{TRij} – współczynnik redukcyjny obliczeniowej różnicy temperatur,

S_{TH} – liczba stopniogodzin w sezonie grzewczym [kKh].

Liczbę stopniogodzin w sezonie grzewczym przyjęto jako 90 kKh, co jest typową wartością dla obszaru Polski

Do obliczeń przyjęto zewnętrzne wymiary budynku.

Przeprowadzona analiza nie uwzględnia strat ciepła przez wentylację, dlatego określenie „straty ciepła” odnosi się tu wyłącznie do strat ciepła poprzez przenikanie przez obudowę termiczną budynku.

Wszystkie obliczenia prowadzono w arkuszu kalkulacyjnym.

4. Wyniki

Ze względu na dużą ilość danych uzyskanych podczas przeprowadzonej analizy, tabela 3 prezentuje zestawienie wybranych, najistotniejszych wyników.

Tabela 3. Zestawienie wybranych wyników

Table 3. Selected calculation results

		Grupy izolacyjności termicznej								
		1964	1974	1982	1991	2002	2008	2013	2017	2021
Q _{max}	kWh	80895,11	72217,66	52939,04	42208,77	32240,53	27243,38	20868,13	19123,21	16976,07
Q _{min}	kWh	59547,43	56564,6	39284,08	31745,75	23487,23	20934,68	16433,13	14843,67	12925,48
ΔQ	kWh	21347,68	15653,06	13654,96	10463,02	8753,301	6308,704	4435,002	4279,544	4050,591
n.Q		26,4%	21,7%	25,8%	24,8%	27,1%	23,2%	21,3%	22,4%	23,9%
n.Q.0		100,0%	73,3%	64,0%	49,0%	41,0%	29,6%	20,8%	20,0%	19,0%

Objaśnienia:

Q_{max} [kWh] – najwyższa wartość strat ciepła w konkretnej grupie izolacyjności termicznej

Q_{min} [kWh] – najniższa wartość strat ciepła w konkretnej grupie izolacyjności termicznej

ΔQ [kWh] różnica najwyższych i najniższych wartości strat ciepła w konkretnej grupie izolacyjności termicznej

n.Q [%] stosunek ΔQ i Q_{max} w konkretnej grupie izolacyjności termicznej

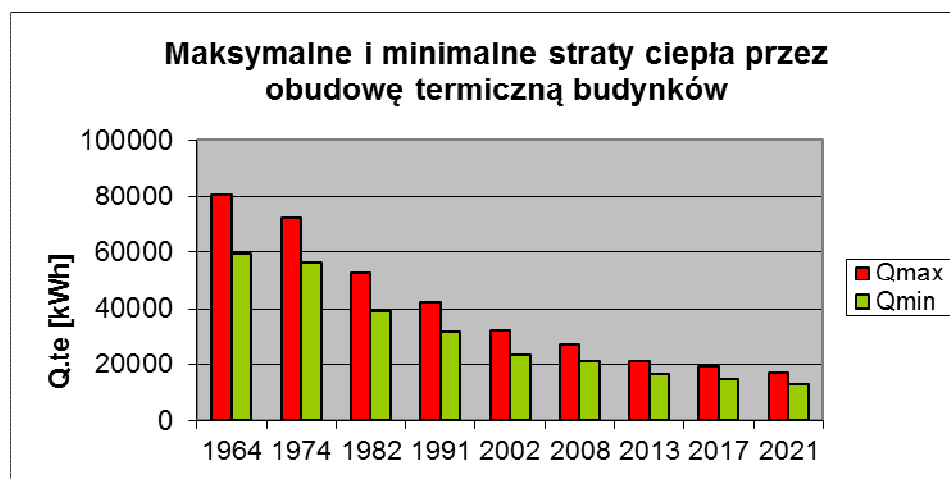
n.Q.0 [%] stosunek ΔQ w konkretnej grupie izolacyjności termicznej i ΔQ uzyskanego w grupie z 1964 r.

4.1. Izolacyjność termiczna a straty ciepła

Wyniki obliczeń udowadniają bardzo duży wpływ wzrostu izolacyjności termicznej obudowy budynku na redukcję strat ciepła przez przenikanie. Dostosowanie izolacyjności termicznej analizowanych budynków do wymogów, jakie będą obowiązywać od 2021 r. poskutkowało we wszystkich przypadkach około pięciokrotną redukcją sezonowych strat ciepła przez obudowę termiczną, w stosunku do budynków spełniających wymogi z 1964 r.

Maksymalne i minimalne straty ciepła w poszczególnych grupach izolacyjności zestawiono na wykresie rys. 1.

Bardzo dobrze dostrzegalna jest tu redukcja strat ciepła wraz z poprawą izolacyjności termicznej przegród budowlanych.



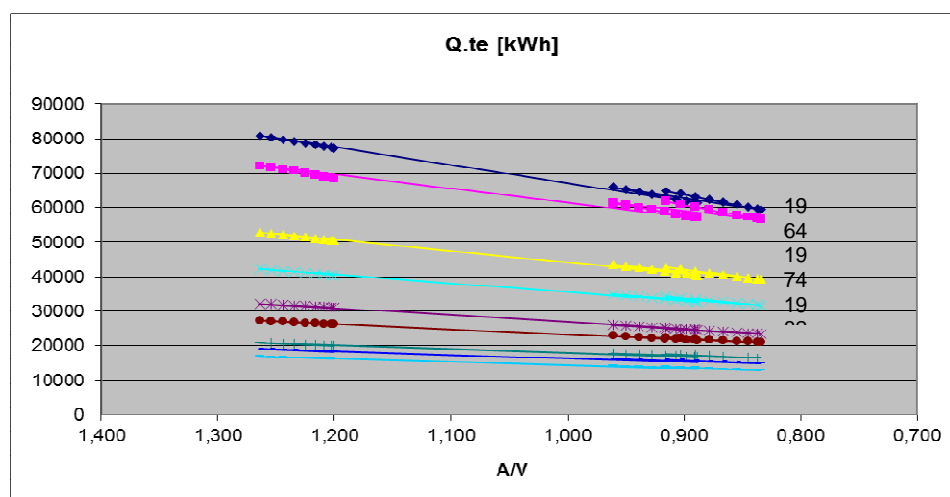
Rys. 1. Otrzymane maksymalne i minimalne wartości strat ciepła

Fig. 1. Maximal and minimal heat losses

4.2. Współczynnik kształtu A/V a straty ciepła

Analiza wyników przeprowadzonych obliczeń wykazuje dostrzegalny wpływ współczynnika kształtu A/V na różnice w stratach ciepła w obrębie konkretnej grupy izolacyjności termicznej. Zależność wielkości strat ciepła od współczynnika kształtu ukazuje rys. 2.

Redukcja stosunku A/V skutkuje niemal proporcjonalnym spadkiem strat ciepła przez obudowę termiczną budynku. Proporcjonalność zaburza fakt, iż



Rys. 2. Zależność strat ciepła Qte od współczynnika kształtu budynku A/V

Fig. 2. Correlation between heat losses Q.te and building's shape factor A/V

w sezonie grzewczym średnia temperatura gruntu pod budynkiem jest wyższa niż średnia temperatura powietrza zewnętrznego. Zjawisko to zostało uwzględnione w [15] poprzez wprowadzenie współczynnika redukcyjnego obliczeniowej różnicy temperatur b.tr, wynoszącego 0,6 dla podłogi na gruncie. Można tu zatem sformułować wniosek, że obecność przestrzeni nieogrzewanych np. poddasza nieużytkowego, piwnicy lub garażu zmniejsza wpływ współczynnika kształtu A/V na straty ciepła przez obudowę termiczną budynku.

Niemniej, zauważalna jest tu prawidłowość, że budynki o stosunkowo niskim A/V, czyli o kształcie obudowy termicznej zbliżonym do sześcianu wykazują najniższe straty ciepła.

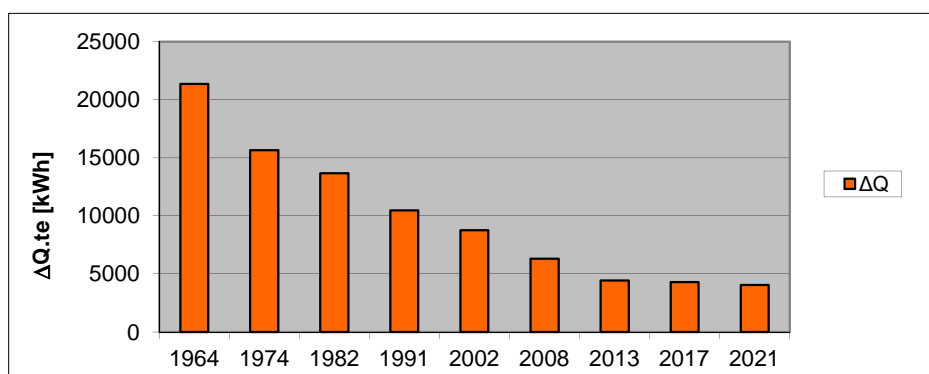
Relacje najniższych i najwyższych wartości strat ciepła były we wszystkich grupach izolacyjności bardzo podobne; różnice wynosiły średnio 24% wartości maksymalnych.

4.3. Wpływ stosunku A/V przy niskiej i wysokiej izolacyjności termicznej

Porównując bezwzględne oszczędności energetyczne wynikające z redukcji stosunku A/V w poszczególnych grupach izolacyjności termicznej, można zauważyć, że te potencjalne oszczędności zauważalnie maleją tu wraz ze wzrostem izolacyjności termicznej przegród budowlanych (rys. 3).

Wśród przeanalizowanych budynków w grupie izolacyjności termicznej z 2021, minimalizacja stosunku A/V pozwoliła tu na uzyskanie co najwyżej 19% oszczędności energetycznych (a zatem i potencjalnie finansowych) dostępnych tak do uzyskania w grupie izolacyjności z 1964 r.

Na tej podstawie można stwierdzić, że w bardzo dobrze izolowanych termicznie budynkach (np. budynkach pasywnych) dążenie za wszelką cenę do zachowania zwartej bryły budynku jest nieuzasadnione, gdyż bardzo wysoka izolacyjność termiczna marginalizuje tu wpływ współczynnika kształtu A/V na wielkość strat ciepła przez przegrody budowlane.



Rys. 3. Maksymalne różnice w wartościach strat ciepła w obrębie poszczególnych grup izolacyjności

Fig. 3. Maximal differences in heat losses among specified insulation groups

5. Wnioski

- Wartość współczynnika kształtu budynku A/V może w zauważalnym stopniu wpływać na wielkość strat ciepła przez obudowę termiczną budynku.
- Nadanie bryle budynku zwartej kształtu i zmniejszenie stosunku A/V umożliwia dostrzegalną redukcję strat ciepła.
- Rzeczywiste oszczędności energetyczne mogące płynąć z nadania obudowie termicznej budynku zwartej kształtu i redukcji stosunku A/V ulegają radykalnemu zmniejszeniu wraz ze wzrostem izolacyjności termicznej przegród budowlanych.
- Wysoka izolacyjność termiczna pozwala dziś na zachowanie większej niż kiedyś swobody w architektonicznym kształtowaniu bryły budynku.

Literatura

- [1] PN-EN ISO 6946: 2008. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła.
- [2] J.A. Pogorzelski: Fizyka Ciepła Budowli, Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1976.
- [3] Współczynnik przenikania ciepła U - historia. Portal termomodernizacyjny Termo24, <http://termo24.pl/docieplenia/wspolczynnik-przenikania-ciepła-u-historia.html> {dostęp 22-11-2016}.
- [4] R. Oleniacz, M. Kasietczuk, M. Rzeszutek: Ocena efektów termomodernizacji budynków jednorodzinnych. 1. Zmniejszenie zużycia ciepła i emisji zanieczyszczeń do powietrza, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture. JCEEA, t.XXXI, z.61 (3/I/14), s. 183-196. DOI: 10.7862/rb.2014.55.
- [5] A. Sedláková, Vladimír Geletka: Shape of buildings and energy consumption, <https://suw.biblos.pk.edu.pl/downloadResource&mId=504384> {dostęp 22.11.2016}.
- [6] A. Panek, J. Rucińska: Analiza godzinowego algorytmu obliczania rocznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia budynku https://suw.biblos.pk.edu.pl/resources/i1/i5/i8/i1/r1581/PanekA_AnalizaGodzinowego.pdf {dostęp 22.11.2016}.
- [7] H. Jedrzejuk, W. Marks: Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization. Basic theory Building and Environment 37 (2002), pp. 1379-1383.
- [8] M. Idczak: Ogólna koncepcja budynku pasywnego - Instytut Budynków Pasywnych przy Narodowej Agencji Poszanowania Energii http://www.nape.pl/upload/File/biblioteka_ibp/Ogolna_koncepcja_budynku_pasywnego.pdf {dostęp 22-11-2016}.
- [9] Xi Chen, Hongxing Yang, Lin Lu: A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 50, October 2015, pp. 1425-1436.

- [10] I. Danielski, M. Fröling, A. Joelsson: The impact of the shape factor on final energy demand in residential buildings in nordic climates. Conference Paper: WREF - The World Renewable Energy Forum, At Denver, Colorado May 2012.
- [11] L. Jevremovic: Passive design applications - industrial architecture perspective, http://www.academia.edu/10276558/passive_design_applications_-_industrial_architecture_perspective {dostęp 22-11-2016}.
- [12] V. Butala, P. Novak: Energy consumption and potential energy savings in old school buildings. *Energy and Buildings* Volume 29, Issue 3, January 1999, pp. 241-246.
- [13] W. Marks: Multicriteria Optimisation of Shape of Energy-Saving Buildings. *Building and Environment*, Vol. 32, No. 4, pp. 331-339, 1997.
- [14] X. Shi, Z. Tian, W. Chen, B. Si, X. Jin: A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 65 November 2016, pp. 872-884.
- [15] DZ.U.2015 poz. 376 2015.04.18. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015r. W sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej.

INFLUENCE OF BUILDING'S SHAPE FACTOR ON ITS HEAT LOSSES WITH RESPECT TO INCREASING REQUIREMENTS FOR BUILDING'S THERMAL INSULATION

S u m m a r y

The purpose of this paper was to determine former, current and future impact of building's shape compactness on its heat losses. The article explains such terms as thermal insulation and heat transfer coefficient of building barrier's, as well as the history of Polish national regulations concerning that subject. It was also explained, what building shape factor is, and what may be its potential impact on building's efficient Energy use. The paper presented conclusions of numerous research on building shape optimization, including critical opinions about architectural effects of the process. The scientific method was based on calculations of seasonal heat losses in multiple buildings varying with their volume to Surface area ratio. Calculations were conducted for twenty seven buildings of the same floor Surface area and interior volume, but of different proportions and number of storeys. Calculations considered nine groups of heat transfer coefficient values for building barriers, that corresponded to former, current and future standards, established by polish regulations Differences in acquired values of seasonal heat losses were interpreted as potential energy savings to be obtained by applying thermal envelopes with low shape factors. Presented results have been compared and basing on them, final conclusions were formed.

Keywords: A/V shape factor, thermal insulation, heat losses, building's thermal envelope

Przesłano do redakcji: 03.06.2017 r

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Sabina KSIĄŻEK¹
Małgorzata KIDA²
Piotr KOSZELNIK³

MOŻLIWOŚCI KATALITYCZNEGO ZASTOSOWANIA MATERIAŁÓW ODPADOWYCH

Zrównoważona chemia stanowi jedną z form działań zmierzających do zmniejszenia zanieczyszczeń środowiska i jest ważnym elementem zrównoważonego rozwoju. Zielona chemia dostarcza rozwiązań do takich globalnych wyzwań jak zmiana klimatu, zrównoważone rolnictwo, energia, zatrucie środowiska i wyczerpywanie bogactw naturalnych. Zielone technologie nie tylko chronią środowisko naturalne, ale zazwyczaj są również korzystne z punktu widzenia ekonomicznego. Podstawowym problemem dla środowiska jest znaczne zmniejszenie się zapasu surowców naturalnych. Zatem, dążenie do większej różnorodności źródeł surowcowych to ważny obszar działania zielonej chemii. Kataliza należy do podstawowych narzędzi realizowania wszystkich zasad zielonej, zrównoważonej chemii wychodząc od badań podstawowych do zastosowań przemysłowych. Według zasad zielonej chemii, gdzie tylko jest to możliwe, powinno dążyć się do stosowania surowców odnawialnych oraz odpadów, które nie tylko zapewniają alternatywne surowce odnawialne, ale także stanowią materiał do produkcji katalizatorów. Zastosowanie materiału naturalnego jako katalizatora lub substratu do wytwarzania katalizatora powoduje nie tylko obniżenie kosztów związanych z produkcją katalizatorów, ale sprawia, że stosowany proces jest przyjazny dla środowiska. Ponadto, wykorzystanie materiałów odpadowych zmniejsza problem unieszkodliwiania odpadów. Wśród najbardziej obfitych zasobów produktów ubocznych technologii są przede wszystkim odpady z rolnictwa, górnictwa i produkcji metali, a w szczególności przemysłu hutniczego. Celem pracy jest scharakteryzowanie właściwości katalitycznych wybranych materiałów odpadowych.

Słowa kluczowe: odpady, kataliza, zielona chemia, zrównoważony rozwój

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Sabina Książek, Politechnika Rzeszowska, Zakład Inżynierii i Chemii Środowiska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 6, tel. 178652407, s.ksiazek@prz.edu.pl

² Małgorzata Kida, Politechnika Rzeszowska, Zakład Inżynierii i Chemii Środowiska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 6, tel. 178652407, mkida@prz.edu.pl

³ Piotr Koszelnik, Politechnika Rzeszowska, Zakład Inżynierii i Chemii Środowiska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 6, tel. 178651065, 178652407, pkoszel@prz.edu.pl

1. Wprowadzenie

W związku z działalnością produkcyjną oraz z użytkowaniem różnego rodzaju wyrobów powstaje coraz więcej odpadów, których zagospodarowanie często jest jednym z najistotniejszych problemów ochrony środowiska. W ostatniej dekadzie XX wieku przemysł chemiczny został zmuszony do całkowitej zmiany w postrzeganiu procesów produkcyjnych. Miało to związek z wprowadzeniem nowego trendu skupionego na zrównoważonym rozwoju. Obecnie czyste, zrównoważone technologie stanowią podstawę wytwórstwa różnorodnych produktów i usług. Zapewniają one odpowiednio wysoką wydajność, zmniejszają koszty, znacznie redukują lub wręcz eliminują negatywny wpływ na środowisko. Zrównoważone technologie cechować powinna bezodpadowość, materiałoszczędność i energooszczędność [20]. Cele te można osiągnąć poprzez wybór surowca, który może być przetworzony w produkt z największą możliwą selektywnością, wybór metody zapewniającej najmniejsze możliwe zużycie energii, wybór najbardziej aktywnego i selektywnego katalizatora i wreszcie udoskonalenie procesów utylizacji i zagospodarowania produktów ubocznych, odpadów i produktów użytkowych [15]. Ograniczanie wytwarzania odpadów to podstawowa zasada zrównoważonego użytkowania zasobów naturalnych i antropogenicznych. Z kolei odzysk surowców i energii z odpadów stanowi podstawowy warunek ochrony zasobów naturalnych [4]. Zgromadzone na składowiskach odpady mają znaczną wartość jako surowce wtórne. Około 25% odpadów stanowi węgiel, 35% - cynk, ołów, żelazo i inne metale, a pozostała część to m.in. iły, popioły, żużle, odpady skalne i kruszywa [7, 14]. Przykładowo, naturalne krzemiany stanowią niezwykle interesujący surowiec do syntezy katalizatorów i adsorbentów. Szeroka gama naturalnych materiałów stałych, takich jak zeolity, iły zawierających żelazo lub miedź, minerały zawierające tlenki żelaza znalazły zastosowanie jako efektywne katalizatory w procesie utleniania związków organicznych. Odpady z przemysłu metalurgicznego, galwanizacyjnego, samochodowego oraz z produkcji aluminium, osady potekologiczne pochodzące ze stacji uzdatniania wody, ze względu na dużą zawartość metali (żelazo, miedź, mangan, cynk) również mogą stanowić katalizatory reakcji utleniania.

W pracy zaprezentowano przykłady zastosowania materiałów naturalnych i odpadowych w reakcjach katalitycznych i w przyjaznych dla środowiska technologiach.

2. Kataliza w zrównoważonej chemii

Na przestrzeni ostatnich lat wzrosło zainteresowanie tzw. "zrównoważoną chemią", czyli chemią ekologiczną i przyjazną dla środowiska. Praktycznie oznacza to, że wykształciło się nowe podejście do zagadnienia syntezy, przeróbki i wykorzystania substancji chemicznych, związane ze zmniejszeniem zagrożenia dla zdrowia człowieka i środowiska [9]. Pojęcie zrównoważonej chemii

powstało na przełomie XX i XXI wieku po opublikowaniu w 1987 r. raportu „Nasza Wspólna Ziemia” prezentującego nową koncepcję „zrównoważonego rozwoju”. W 2000 roku Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju zdefiniowała pojęcie „zrównoważonej chemii” jako rozwinięcie pojęcia „zrównoważonego rozwoju”. Oznacza ono projektowanie, wytwarzanie i wykorzystywanie w technologiach chemicznych produktów pozwalających na osiągnięcie dużych korzyści ekonomicznych i jednocześnie przyjaznych środowisku. W trakcie projektowania i prowadzenia procesów chemicznych należy zmniejszać ilość zużywanej energii, surowców nieodnawialnych i wody. Koncepcja „zrównoważonej chemii” nakazuje również redukować ilość wytwarzanych zanieczyszczeń i odpadów na każdym etapie produkcji oraz produkować takie produkty chemiczne, które mogą być użyte ponownie lub poddane recyklingowi [6]. Ważnym obszarem działań w ramach zrównoważonej chemii jest poszukiwanie nowych sposobów przyspieszania i katalizy procesów chemicznych. Kataliza odgrywa niezwykle istotną rolę w zapobieganiu i usuwaniu skutków zanieczyszczeń środowiska naturalnego. Rola ta przejawia się zarówno w zakresie badań podstawowych, jak i w zastosowaniach przemysłowych. Reakcje katalityczne powodują zwykle zmniejszenie zapotrzebowania energii i zwiększenie selektywności. Takie reakcje wymagają zmniejszonej liczby reagentów, a te ostatnie mogą być surowcami odnawialnymi [12]. Kataliza i procesy katalityczne stanowią podstawę nowoczesnego przemysłu chemicznego, petrochemicznego i farmaceutycznego. Stanowią również istotne ogniwo w walce z eliminacją szkodliwych i niebezpiecznych odpadów, przez co zapobiegają zanieczyszczeniom środowiska [5].

3. Przykłady katalitycznych zastosowań materiałów naturalnych i odpadowych

W ostatnich latach wzrasta ilość doniesień literaturowych dotyczących sposobu wytwarzania katalizatorów heterogenicznych z materiałów odpadowych (naturalnych i przemysłowych). Zwiększonym zainteresowaniem cieszą się produkty uboczne procesów technologicznych, które mogą stać się potencjalnymi materiałami o rozszerzonej funkcjonalności. To zainteresowanie wynika głównie z aspektu ekonomicznego i środowiskowego. Materiały odpadowe często stanowią cenne surowce do produkcji katalizatorów lub same stanowią aktywne katalizatory. Dodatkowo, wykorzystanie materiałów odpadowych zmniejsza problem unieszkodliwiania odpadów, przez co wpisuje się w zakres zrównoważonego rozwoju i zielonej chemii. Wśród najbardziej obfitych zasobów produktów ubocznych technologii są przede wszystkim odpady z rolnictwa, górnictwa i produkcji metali, a w szczególności przemysłu hutniczego [3]. W tabeli 1 i 2 przedstawiono przykładowe materiały odpadowe posiadające właściwości katalityczne oraz ich zastosowanie w reakcjach chemicznych.

Tabela 1. Przykłady materiałów odpadowych o właściwościach katalitycznych

Table 1. Examples of waste materials having a catalytic properties

Materiał odpadowy	Wielkość produkcji	Literatura
Czerwony szlam	>70 mln ton rocznie w skali światowej	[13]
Żużel aluminiowy	5 mln ton rocznie w skali światowej	[2]
Popiół lotny	430 mln ton w skali światowej (2003 rok)	[17]
Żużel żelazowy	240-290 mln w skali światowej (2008 rok)	[11]
Skorupki jaj kurzych	4 mln ton rocznie (Chiny)	[18]
Łuski ryżu	70 mln rocznie w skali światowej	[2]

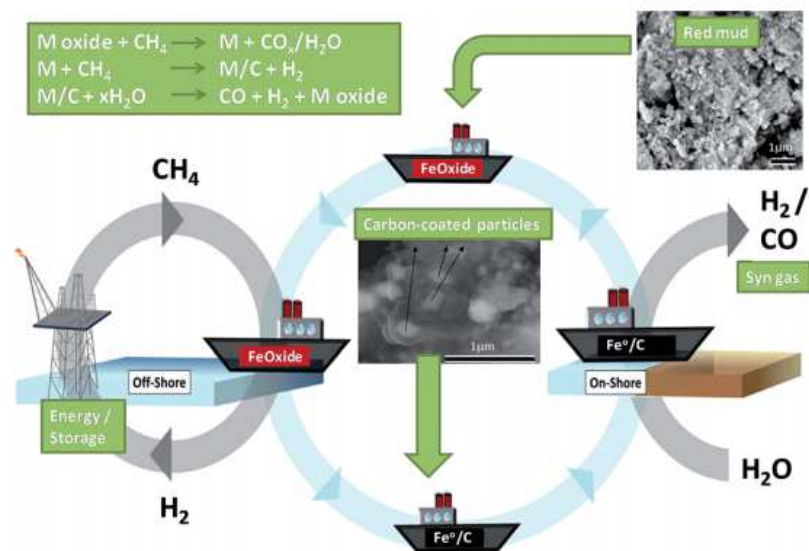
Przykładem poprodukcyjnego materiału odpadowego jest czerwony szlam. Jest on produktem ubocznym w procesie Bayera, czyli powstaje podczas produkcji aluminium. Roczna ilość tego rodzaju odpadu stale rośnie, ze względu na rosnące światowe zapotrzebowanie na aluminium. O właściwościach katalitycznych tego materiału decyduje stosunkowo duża zawartość żelaza, która nadaje szeroką gamę ciekawych katalitycznych właściwości. Czerwony szlam znalazł zastosowanie m.in. bezpośrednio jako składnik aktywny, np. w produkcji H_2 i ketonizacji, w reakcjach utleniania, uwodornienia lub też jako nośnik wielu katalizatorów [2].

Tabela 2. Przykłady zastosowania materiałów odpadowych

Table 2. Examples of the uses of waste materials

Materiał odpadowy	Składnik aktywny	Zastosowanie	Literatura
Żużel	SiO_2	Utlenianie CO i lotnych związków organicznych	[3]
	TiO_2	Denitryfikacja	
	MgO-CaO/ SiO_2	Transestryfikacja	
Czerwony szlam	Fe	Produkcja H_2	
	Fe_2O_3	Ketonizacja	
Popiół lotny	CaO	Transestryfikacja	
	V_2O_5	Utlenianie toluenu	
	Cu	Hydrogenoliza glicerolu	

Badania zespołu Teixeira potwierdziły możliwość wykorzystania czerwonego szlamu jako źródła aktywnego katalizatora konwersji gazu ziemnego, mieszaniny metanu i innych węglowodorów (rys. 1) [16].

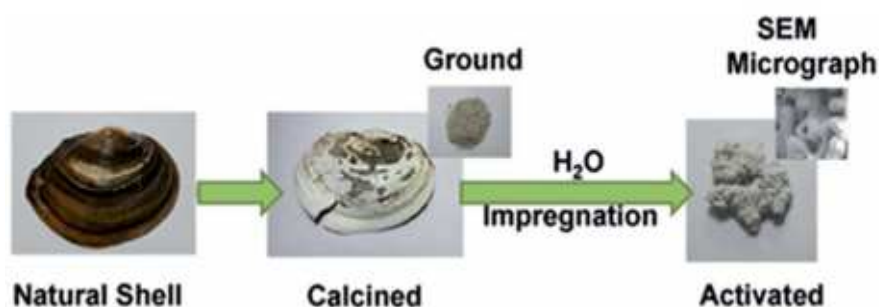


Rys. 1. Schemat procesu depozycji węgla i konwersji gazu ziemnego w obecności czerwonego szlamu, opracowano na podstawie [3]

Fig. 1. Diagram of the process of deposition of coal and conversion of natural gas in the presence of red mud, based on [3]

Kolejnym przemysłowym produktem ubocznym jest popiół lotny, który jest drobnoziarnistą frakcją cząstek powstających podczas spalania paliw. Składowanie odpadów ze spalania węgla jest szczególnie uciążliwe i kosztowne, głównie ze względu na niezbędne zabezpieczenia zapobiegające wywiewaniu pyłu i izolację gruntów. Produkcję samego popiołu lotnego, który stanowi największy procent wszystkich ubocznych produktów spalania węgla (ok. 50–70%) [10], w USA i Unii Europejskiej średnio ocenia się na ponad 100 mln ton rocznie, gdzie 60% tych odpadów jest składowane. Skład popiołów jest uzależniony od rodzaju spalanych materiałów i zastosowanej technologii. Głównie zawiera Al_2O_3 i SiO_2 oraz dodatki, takie jak Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O i Na_2O [18, 19]. W trakcie poszukiwania nowych kierunków wykorzystania popiołów lotnych, stwierdzono podobieństwo ich składu chemicznego i mineralnego do niektórych materiałów naturalnych (m.in. zeolitów). Na podstawie tych obserwacji zapoczątkowane zostały prace dotyczące syntezy zeolitów i innych glinokrzemianów z popiołów lotnych [8]. Zeolity są mikroporowatymi, uwodnionymi glinokrzemianami pierwiastków alkalicznych, ziem alkalicznych lub innych kationów, które w swojej strukturze krystalicznej zawierają liczne kanały i komory o różnych rozmiarach nadające im szereg charakterystycznych właściwości sorpcyjnych, jonowymiennych, molekularno-sitowych oraz katalitycznych. Materiały porowate mają rozpowszechnione zastosowanie (katalizatory, nośniki katalizatorów) ze względu na ich wysoką odporność termiczną, hydrotermalną, mecha-

niczną i chemiczną. Do najważniejszych zeolitów tworzących złoża należą klinoptylolit, filipsyt, chabazyt i mordenit. Z danych literaturowych wynika, iż z każdego rodzaju popiołów, stosując odpowiednią metodologię prac laboratoryjnych, można otrzymać różne struktury zeolitowe m.in.: analcym, chabazyt, kankrynit, NaP1, ZSM-5, ZMS-28, Na-X, Na-Y, filipsyt, sodalit [1]. W ostatnim czasie pojawiło się również wiele badań naukowych dotyczących wykorzystania materiałów naturalnych, np. muszli małż, ślimaków, żółwi i skorupki jaj kurzych, łuski ryżu, materiałów ilastych, minerałów, gleb bogatych w metale, itp. do wytwarzania katalizatorów transestryfikacji i utleniania związków organicznych w procesie Fentona. Przykładowo, muszle w wyniku kalcynacji w wysokiej temperaturze przekształcają się w materiał bogaty w CaO (w wyniku rozkładu CaCO_3). Katalizatory oparte na tlenku wapnia są obecnie przedmiotem zainteresowań wielu badaczy zajmujących się produkcją biodiesla [2]. Rysunek 2 przedstawia proponowany sposób syntezy katalizatora transestryfikacji z muszli małż.



Rys. 2. Etapy wytwarzania katalizatora transestryfikacji z muszli małż, opracowano na podstawie [3]

Fig. 2. Manufacturing steps of a transesterification catalyst from mussel shells, based on [3]

4. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono przykłady wykorzystania materiałów odpadowych w katalizie. Odpady można ogólnie podzielić na przemysłowe (np. czerwony szlam, żużel aluminium, osady po odżelazianiu wody) oraz te, które pochodzą ze źródeł naturalnych (np. skorupki jaj, łuski ryżu, zeolity, minerały). W niektórych przypadkach, materiały te mogą być bezpośrednio stosowane jako katalizatory, podczas gdy w innych, stosuje się je jako składniki, z których można wytwarzać materiały posiadające właściwości katalityczne. Oprócz generowania aktywnych, selektywnych i stabilnych katalizatorów, surowce wykorzystywane do ich produkcji powinny być bezpieczne do gromadzenia, a ich przetworzenie nie powinno generować nowych szkodliwych produktów ubocznych.

Literatura

- [1] Anielak A.M.: Właściwości fizykochemiczne klinoptylolitu modyfikowanego ditlenkiem manganu, *Przemysł Chemiczny*, 85, 7, 2006, s. 487-491.
- [2] Balakrishnan M., Batra V.S., Hargreaves J.S.J., Pulford I.D.: Waste materials–catalytic opportunities: an overview of the application of large scale waste materials as resources for catalytic applications, *Green Chemistry*, vol. 13, no. 1, 2011, pp. 16-24.
- [3] Bennett J.A., Wilson K., Lee A.F.: Catalytic applications of waste derived materials, *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 4, no. 10, pp. 3617-3637.
- [4] Borowski G.: Produkty odpadowe jako surowce wtórne, *Inżynieria ekologiczna*, 21, 2009, s. 85-95.
- [5] Burczyk B.: Zielona chemia: zadania, cele, przykłady osiągnięć, *Wiadomości Chemiczne*, 56, 2002, s. 709-770.
- [6] Burdyński M.: Zrównoważona chemia. *Laborant*, 3, 2011, s. 9-11.
- [7] Dębska B., Górka K.: Ocena możliwości zagospodarowania odpadów w sektorze budowlanym. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture, JCEEA*, 63, 3, 2016, s. 67-74.
- [8] Franus W., Wdowin M.: Wykorzystanie popiołów lotnych klasy F do produkcji materiału zeolitowego na skalę półtechniczną, *Polityka Energetyczna*, 20, 2, 2011, s. 79-91.
- [9] Górka K.: Ekonomiczne aspekty ochrony środowiska naturalnego, *Problemy Ekologii*, 21, 1997, s. 2-9.
- [10] Kłojzy-Karczmarczyk B.: Zastosowanie odpadów energetycznych w ograniczaniu transportu zanieczyszczeń ze składowisk odpadów górniczych, *Studia, Rozprawy, Monografie*, 2003, s. 117-113.
- [11] Kuwahara Y., Ohmichi T., Kamegawa T., Mori K., Yamashita H.: A novel conversion process for waste slag: synthesis of a hydrotalcite-like compound and zeolite from blast furnace slag and evaluation of adsorption capacities. *Journal of Materials Chemistry*, vol. 20, no. 24, 2010, pp. 5052-5062.
- [12] Paryjczak T., Lewicki A.: Zielona chemia. Wybrane zagadnienia, *Przemysł Chemiczny*, 82, 2003, s. 525-531.
- [13] Pontikes Y., Rathossi C., Nikolopoulos P., Angelopoulos G.N., Jayaseelan D., Lee W.E.: Effect of firing temperature and atmosphere on sintering of ceramics made from Bayer process bauxite residue. *Ceramics international*, vol. 35, no. 1, 2009, pp. 401-407.
- [14] Rosik-Dulewska C.: *Podstawy gospodarki odpadami*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2015.
- [15] Taniewski M.: Rola chemii i przemysłu chemicznego w rozwoju technicznym i gospodarczym świata na przełomie XX i XXI wieku, *Przemysł Chemiczny*, 72, 7, 1993, s. 263-266.
- [16] Teixeira I.F., Medeiros T.P., Freitas P.E., Rosmaninho M.G., Ardisson J.D., Lago R.M.: Carbon deposition and oxidation using the waste red mud: A route to store,

- transport and use offshore gas lost in petroleum exploration, *Fuel*, vol. 124, 2014, pp. 7-13.
- [17] Wang S.: Application of solid ash based catalysts in heterogeneous catalysis, *Environmental science & technology*, vol. 42, no. 19, 2008, pp. 7055-7063.
- [18] Wei Z., Xu C., Li B.: Application of waste eggshell as low-cost solid catalyst for biodiesel production, *Bioresource technology*, vol. 100, no. 11, 2009, pp. 2883-2885.
- [19] Xuan X., Yue C., Li S., Yao Q.: Selective catalytic reduction of NO by ammonia with fly ash catalyst. *Fuel*, vol. 82, no. 5, 2003, pp. 575-579.
- [20] Zdyb A.: Wybrane możliwości zastosowania nanostruktur w inżynierii środowiska, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture, JCEEA*, z. 62, 2, 2015, s. 611-617. DOI: 10.7862/rb.2015.90.

POSSIBILITIES OF THE CATALYTIC APPLICATION OF WASTE MATERIALS

Summary

Sustainable chemistry is one of the forms of action to reduce pollution of the environment and it is an important element of sustainable development. Green chemistry provides solutions to such global challenges as climate change, sustainable agriculture, energy, toxics in the environment and the depletion of natural resources. Green technology will not only protect the environment, but they are usually also preferable from the economic point of view. The main concern for the environment is a significant reduction in the supply of natural materials. Therefore, the pursuit of a greater variety of sources of natural materials is an important area of activity of green chemistry. Catalysis is one of the basic tools of implementation of all principles of green, sustainable chemistry, from basic research to industrial applications. According to the seventh principle of green chemistry, where possible, should seek to use renewable raw materials and waste, which not only provide alternative renewable raw materials, but also provide the material for the production of catalysts. The use of natural material or waste material as catalyst or a substrate for the preparation of the catalyst will not only reduce the costs associated with the production of catalysts, but makes the used process is environmentally friendly. Waste materials also are valuable materials for the production of catalysts or are themselves active catalysts. In addition, the use of waste materials reduces the problem of waste disposal. Among the most abundant resources of technology products are primarily agricultural, mining and metals, and in particular the steel industry. The aim of the work is to characterize the catalytic properties of selected waste materials.

Keywords: waste, catalysis, green chemistry, sustainable development

Przesłano do redakcji: 1.02.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Roman CIEŚLIŃSKI¹
Michał PRZYBYLSKI²

OCENA HYDROCHEMICZNA KLĘSKI EKOLOGICZNEJ NA JEZIORZE DRUŻNO I RZECIE WĄSKIEJ W 2014 ROKU

Celem pracy jest ocena hydrochemiczna wpływu zanieczyszczeń, jakie wprowadzono w dniach 19-20.05. 2014 roku do rzeki Wąskiej, a następnie Jeziora Drużno i ustalenie czy można ten incydent traktować jak klęskę ekologiczną. Z Jeziora Drużno wyłowionych zostało bowiem w tym czasie około 2 ton martwych ryb, w tym również gatunków będących pod ochroną, a także drobnych organizmów wodnych takich jak ślimaki i małże. Pozostaje do wyjaśnienia czy przyczyną tego stanu rzeczy był wpływ zanieczyszczeń z zakładu „Sery” ICC Pasłęk. Dlatego przeprowadzono kwerendę materiałów źródłowych oraz badania terenowe i laboratoryjne. W 2015 roku dokonano poboru próbek wody z rzeki Wąskiej i Jeziora Drużno, które następnie poddano analizie pod kątem określenia stężeń takich wskaźników jak azot azotanowy(III), azot azotanowy(V), azot amonowy. Wykonano również modelowanie transportu zanieczyszczeń na rzece Wąskiej przy użyciu programu HEC-RAS. W efekcie ustalono, że zanieczyszczenia jakie dostały się poprzez rzekę Brzezinkę do Wąskiej miały charakter lokalny i nie było podstaw do uznania tego wydarzenia jako klęski ekologicznej tego regionu.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie, jakość, amoniak, transport

1. Wstęp

Woda jest jednym z najważniejszych elementów zaspokajających potrzeby człowieka. Dlatego w jego interesie jest to, aby dbać o nią pod względem czystości i przydatności. Szczególny wpływ na zanieczyszczenie wody ma działalność gospodarcza człowieka, jak i wiele innych uwarunkowań antropogenicznych i naturalnych, które w ekstremalnych sytuacjach prowadzą do klęsk ekologicznych.

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Roman Cieśliński, Uniwersytet Gdański, Katedra Hydrologii, ul. Bażyńskiego 4, 80-952 Gdańsk, tel. 585236529, georc@univ.gda.pl

² Michał Przybylski, Biuro Projektów Środowiskowych w Gdańsku, ul. Heweliusza 11, 80-890 Gdańsk, tel. 514326411, oddzialywanie@gmail.com

Kłęski ekologiczne to zjawiska, które powodują zmiany w środowisku w danym obszarze dla danych populacji czy gatunków w taki sposób, że brak jest możliwości egzystencji w miejscu ich bytowania. Kłęski ekologiczne zachodzą w różnych sytuacjach, choć główną ich przyczyną są zmiany abiotyczne środowiska wynikające choćby z dopływu opadów atmosferycznych, zmian temperatury, czy presji drapieżników. Wpływ na pojawienie się katastrofy ekologicznej mają także zanieczyszczenia środowiska, wycinka lasów, zmiany klimatyczne, czy zakwaszenie wód. Według mediów i instytucji związanych z ochroną środowiska jedną z największych klęsk ekologicznych obszaru Żuław Wiślanych jest ta, która miała miejsce w maju 2014 roku i dotyczyła jeziora Druzno i rzeki Wąskiej. W niniejszej pracy dokonana będzie próba ustalenia, czy rzeczywiście była to klęska ekologiczna, czy raczej incydentalne zanieczyszczenie wód.

Celem głównym pracy jest ocena hydrochemiczna wpływu zanieczyszczeń, jakie wprowadzono w dniach 19-20.05.2014 roku do rzeki Wąskiej w trakcie awarii w zakładzie „Sery” ICC Pasłek na warunki jakościowe i środowiskowe rzeki oraz pośrednio jeziora Druzno. Celem dodatkowym pracy jest ustalenie rzeczywistych wartości obliczonych zanieczyszczeń w stosunku do tych podawanych przez instytucje państwowe. Również ważne jest przedstawienie procesu transportu zanieczyszczeń rozpuszczonych w wodach rzeki Wąskiej. W związku z tym, że głównym zanieczyszczeniem był azot amonowy, w pracy ograniczono się do jego oceny, a także udziału innych zjawisk w procesie oczyszczania rzeki, które mają miejsce w trakcie jego przemian w środowisku wodnym. W ramach uzupełnienia prześledzono zmiany stężeń azotu azotanowego(III) i azotu azotanowego(V). Ponadto w dalszej części pracy przedstawiono przeliczenia oraz dane dotyczące innych form wyrażania azotu amonowego jak: jon amonowy NH_4^+ , niejonowa forma amoniaku NH_3 , cząsteczkowa forma jonów amonowych i niejonowych form amoniaku $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$. Jako główny obiekt badań wybrano rzekę Wąską, gdyż ona jako podstawowy odbiornik zanieczyszczeń jest bardziej narażona na presję zanieczyszczeń.

2. Metody badań

Główne prace polegały na kwerendzie materiałów źródłowych uzyskiwanych z instytucji państwowych m.in. Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej i Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska, a także z pozycji literatury przedmiotu, które dotyczyły obszaru badań, jak i informacji merytorycznych dotyczących pracy. Wykonano również prace kameralne polegające na opracowaniu danych i ich analizie. Analizie poddane zostały nie tylko dane dotyczące jakości wody, ale także dane hydrologiczne i hydrauliczne, które mają istotny wpływ na odbiór zanieczyszczeń i ich przemieszczanie się w zlewni.

W pracy posilkowano się własnymi pomiarami hydrochemicznymi, które wykonano w 2015 roku. Analizy wykonano w laboratorium hydrochemicznym Katedry Hydrologii Uniwersytetu Gdańskiego, przy użyciu chromatografu jonowego Dionex C1100 i spektrofotometru Nova 400 firmy Merck. Dotyczyły one oznaczenia azotu amonowego, azotu azotanowego(III) i azotu azotanowego(V). Pomiary wartości pH i temperatury w terenie wykonywano przy użyciu urządzenia wieloparametrowego HQ40 firmy HachLange pomiarów pH wody i temperatury.

Zgodnie z metodyką obliczeń azotu niejonowego NH_3 w wodzie [1] wykonano obliczenia tła korzystając z równania:

$$(N-NH_4)_i \cdot (x) \cdot (17,031/14,0067) = NH_3 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3} \quad (1)$$

gdzie: $N-NH_4$ – zawartość azotu amonowego,

x- dane z tablicy metodycznej [2],

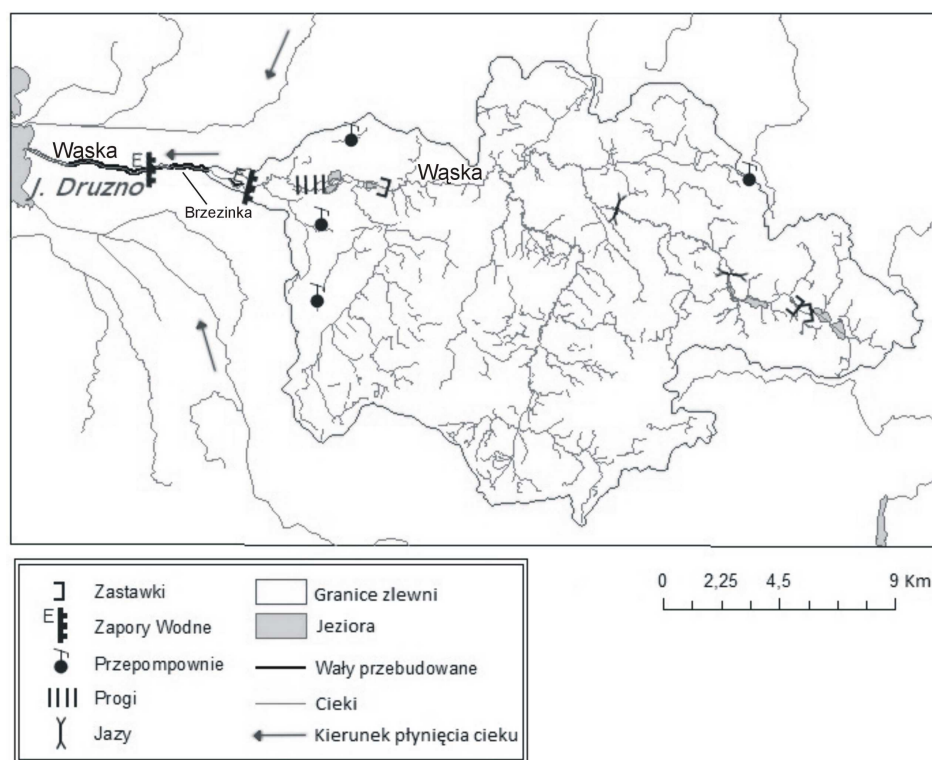
(17,031/14,0067) – przeliczenie $N-NH_3$ na NH_3 .

W ramach pracy przedstawiono proces transportu zanieczyszczeń rozpuszczonych w wodach rzeki Wąskiej pod kątem niekontrolowanego zrzutu azotu amonowego z zakładu mleczarskiego „Sery” ICC Pasłęk. W modelowaniu przyjęto założenie, że obliczenia zostaną wykonane dla 2 scenariuszy dotyczących przepływu przy odtworzeniu zrzutu wód zanieczyszczonych azotem amonowym z zakładowej oczyszczalni ścieków do potoku Brzezinka, a następnie z wodami potoku Brzezinka do rzeki Wąska. Obliczenia zostały wykonane w warunkach ruchu ustalonego dla natężenia przepływu, który wystąpił w dniach 19 i 20 maja 2014r. w rzece Wąska i potoku Brzezinka z uwzględnieniem piętrzenia na stopniach wodnych „Krosno” i „Druzno” oraz stanu wody w Jeziorze Druzno. Przyjęto założenie, że zrzut wód zanieczyszczonych azotem amonowym wystąpił w ciągu 9 godzin w dniu awarii (pojedyncza fala zanieczyszczeń) oraz przy założeniu, że zrzut wystąpił w ciągu 9 godzin w dniu awarii oraz w ciągu 5 godzin podczas płukania zbiorników w dniu następnym (2 fale zanieczyszczeń). Opracowanie wykonano w programie HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Centre-River Analysis System).

3. Charakterystyka hydrologiczna rzeki Wąska

Rzeka Wąska (rys. 1) jest rzeką II-rzędu, o długości 45,2 km. Powierzchnia zlewni wynosi około 277 km² [3]. W pobliżu miejscowości Wężina uchodzi ona do jeziora Druzno. Ma cechy rzeki wyżynnej i nizinnej. Górny odcinek rzeki ma charakter górski i podgórski, zaś ujściowy nizinny. Średni spadek rzeki wynosi 2,5‰, a przy ujściu 0,02‰, zaś przepływ przy ujściu 2,3 m³·s⁻¹. Średni roczny przepływ dla wielolecia 1961-1990 wynosi 1,99 m³·s⁻¹. Według Drwala [4] średni roczny przepływ wody z wielolecia w rzece Wąskiej wynosi natomiast 2,18 m³·s⁻¹, co daje wartość dopływu do jeziora Druzno na poziomie około 69 mln m³ wody. Jest to jeden z dwóch głównych dopływów do jeziora Druzno,

obok rzeki Dzierzgoń, dla którego szacuje się zasilanie na poziomie około 32% całego dopływu ze zlewni do niecki jeziora Druzno [5]. Współczynnik nieregularności średnich rocznych przepływów na rzece Wąskiej wyniósł 1,96 [6]. Świadczy to o dużej stabilności przepływu rocznego dla rzeki i nieznacznych różnicach pomiędzy przepływem roku wilgotnego i suchego. Głębokość średnia cieków waha się od 0,2 do 1,2 m, a maksymalna dochodzi do 2,5 m [7, 8]. Do rzeki Wąskiej dopływa 39 cieków. Jest rzeką asymetryczną, gdzie dominują dopływy lewobrzeżne (21 cieków). Rzeką Wąską wypływa z przykrawędziowej części pojezierza Iławskiego, na zachód od wsi Gudniki [9]. W górnym odcinku przepływa przez kilka zbiorników zaporowych (jeziora Okonie i Zimnochy). Przepływa również przez kilka stawów rybnych. Środkowy odcinek Wąskiej, leżący w obrębie Równiny Warmińskiej, charakteryzuje się głęboką (30 m) doliną, wypełnioną madami i piaskami rzecznyymi [9]. Poniżej Pastęka Wąska wpływa na teren delty Wisły i jest obwałowana ze względu na zagrożenie powodziowe [10]. Na terenie zlewni Wąskiej zlokalizowanych jest 2 jazy, 4 zastawki, 4 pompownie, próg oraz 2 zapory wodne (rys. 1).



Rys. 1. Szkic hydrograficzny zlewni rzeki Wąska

Fig. 1. Hydrographic draft of the River Wąska catchment

Jednym z dopływów Wąskiej jest potok Brzezinka, który jest odbiornikiem ścieków pochodzących z zakładu mleczarskiego „Sery” ICC Pasłek. Ponadto rzeka Wąska jest odbiornikiem ścieków z mechaniczno-biologicznych oczyszczalni ścieków w Pasłuku i Wężynie. Również mleczarnia „Sery” ICC Pasłek poprzez rzekę Brzezinkę odprowadza około $880 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ścieków oczyszczanych mechaniczno-biologicznie. Wąska na kilku odcinkach jest źródłem zasilania stawów rybnych, które mają wpływ na jakość wód rzeki. Może być zatem zagrożona zanieczyszczeniem przez wiele źródeł, a w konsekwencji wpływać na zanieczyszczenie samego Jeziora Druzno, do którego uchodzi. Jednakże według Fac-Benedy [11] jezioro cechuje się niejednorodnym środowiskiem wodnym o niestabilnych w czasie parametrach jakościowych. Niejednorodność struktury systemu limnicznego ma swoje odzwierciedlenie m.in. w składzie chemicznym.

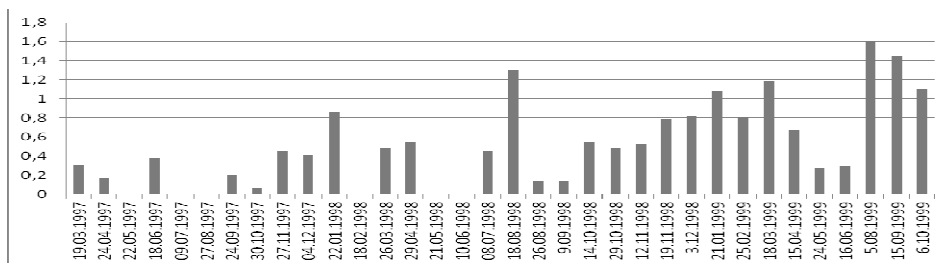
4. Uzyskane wyniki i dyskusja

4.1. Stan jakościowy wód analizowanych obiektów na podstawie danych WIOŚ i danych literaturowych

Stan jakościowy rzeki Wąskiej oceniany był przez WIOŚ w Olsztynie oddział w Elblągu w kilku terminach m.in. w roku 2004, 2007 i 2012. Badania wykonane w 2004 roku dały podstawę do zakwalifikowania rzeki na całej długości do IV klasy czystości [12]. O takiej klasyfikacji zdecydowały: barwa, zawiesina ogólna, substancje organiczne (ChZT-Mn, ChZT-Cr), azot Kjeldahla oraz fosforany. Z kolei badania wykonane w 2007 roku wykazały, że wody rzeki Wąskiej w punkcie pomiarowo-kontrolnym zlokalizowanym na odcinku ujściowym do jeziora Druzno oceniono jako IV klasy [13]. Powodem takiej oceny była wysoka wartość barwy oraz stężenie fosforanów i azotu Kjeldahla. Kolejne badania wykonane w 2012 roku w Jednolitej Części Wód „Wąska od Sały do wpływu do jeziora Druzno” w punkcie Wąska – Wężina potwierdziły, że jej stan jest zły [14]. Przechodząc do szczegółowych badań w 2012 roku ustalono, że azot amonowy w wodach Wąskiej przyjmował wartości w zakresie $0,07\text{-}0,88 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, zaś średnia dla całego roku wyniosła $0,29 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Azot azotanowy(III) w tym czasie mieścił się w przedziale od $0,07$ do $0,017 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, przy średniej dla całego roku - $0,05 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Natomiast azot azotanowy(V) mieścił się w zakresie od $0,26$ do $0,93 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, przy średniej w roku wynoszącej $0,74 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że występuje sezonowa zmienność stężeń analizowanych wskaźników, o której pisali Drwal i Cieśliński [15]. Według Bogdanowicza [16], najmniejsze stężenia azotu są obserwowane dla sezonu wegetacyjnego (głównie lipiec i sierpień), co związane jest z największą intensywnością procesów wzrostu roślin. Taki rytm wskazuje na dominującą rolę powierzchniowych źródeł zanieczyszczeń [17]. Z kolei według Przybylskiego i in. [18] duży wpływ na stan jakości wód Jeziora Druzno i rzeki Wąskiej wywiera roślinność i pactwo wodne. W okresie od marca do czerwca na skutek rozpoczęcia wegetacji roślin następował spadek

zawartości azotu azotanowego(V) w wodzie, natomiast w październiku nastąpił jego wzrost będący wynikiem obumierania roślinności. Z kolei od czerwca do sierpnia duża ilość pŁactwa wodnego przyczyniła się do wzrostu zawartości amoniaku w wodzie Jeziora Druzno (do $3 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ NH}_4$ w sierpniu 1998 r.).

Potwierdzeniem powyższych spostrzeżeń są wyniki azotu amonowego w wodach rzeki Wąska w profilu pomiarowym w Węzinie, dla okresu od marca 1997 roku do października 1999 roku wykonane w Katedrze Hydrologii Uniwersytetu Gdańskiego. Zauważyć można w nich duże zróżnicowanie jego stężeń. Wartości te wahały się bowiem od wartości śladowych na poziomie bliskim 0, które zaobserwowano w maju, lipcu i sierpniu 1997 roku oraz lutym, maju i czerwcu 1998 roku do wartości $1,61 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ zanotowanej w sierpniu 1999 roku (rys. 2).



Rys. 2. Stężenie azotu amonowego ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) w wodach rzeki Wąska (profil Węzina) w okresie marzec 1997 – październik 1999

Fig. 2. The concentration of ammonia nitrogen ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) in the waters of the river Wąska (profile Węzina) in the period March 1997 - October 1999

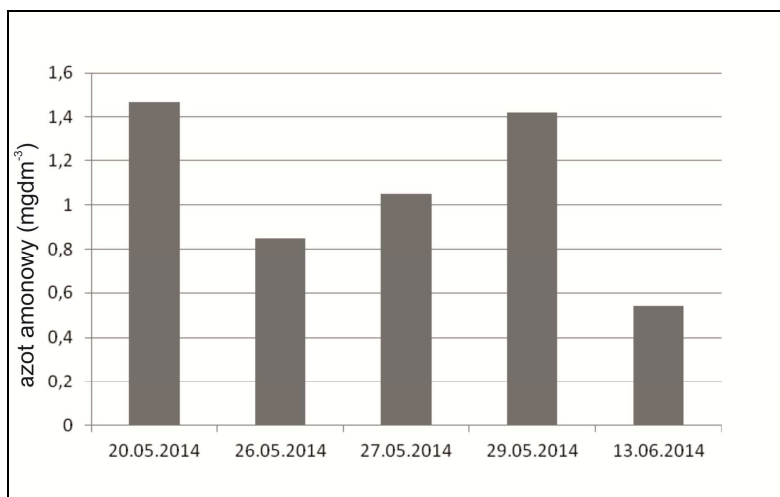
4.2. Stan jakościowy rzeki Wąskiej w trakcie awarii z 19-20.05. 2014 oraz po awarii w zakładach „Sery” ICC Pasłęk na podstawie danych WIOŚ

W trakcie wystąpienia w dniach 19-20.05. 2014 roku awarii w zakładzie „Sery” ICC Pasłęk, w trakcie której wypłynęła do rzeki Wąskiej zanieczyszczona woda lodowa, odpowiednie służby ochrony środowiska przeprowadziły liczne badania jakościowe. Główną przyczyną interwencji WIOŚ w Olsztynie oddział Elbląg były śnięcia ryb na rzekach Struga Brzezińska i Wąska. W związku z tym dokonano poboru próbek wody do dalszych analiz laboratoryjnych w dniach 20., 26. i 27 maja 2014 roku.

W dniu 20.05.2014 roku tj. w drugim dniu awarii odnotowano w punkcie pomiarowym poniżej elektrowni Lisów, że stężenie azotu amonowego wyniosło $1,47 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. W tym samym czasie stężenie azotu azotanowego(III) nie przekraczało wartości 0,05, zaś azotu azotanowego(V) $0,603 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Przy kolejnym pomiarze wykonanym w dniu 26.05.2014 roku w tym samym punkcie pomiarowym co poprzednio, stężenie azotu amonowego wynosiło $0,85 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Pozostałe analizowane wskaźniki tj. azot azotanowy(III) i azot azotanowy(V) osiągnęły odpowiednio wartości $<0,05$ i $0,54 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. W dniu 26.05.2014 roku wykonano także pomiar w punkcie pomiarowym w miejscowości Węzina. Dla tego punktu

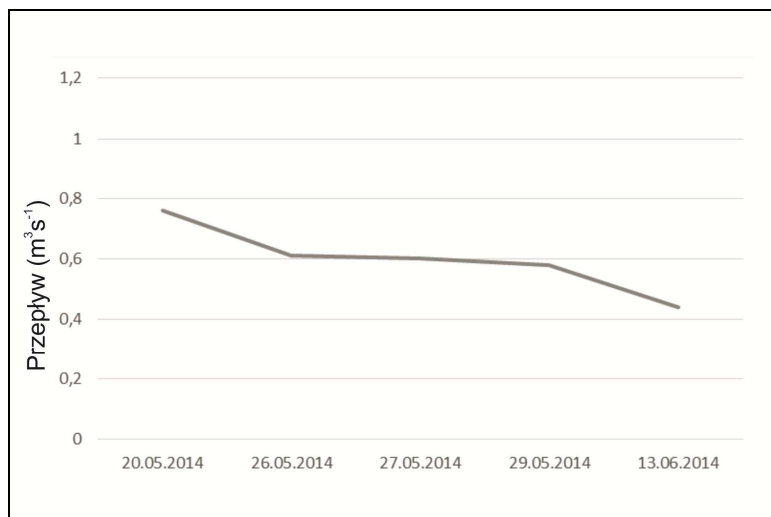
stężenie azotu amonowego osiągnęło wartość $1,09 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, zaś azotu azotanowego (III) $0,746 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i azotu azotanowego (V) $0,758 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. W dniu 27.05.2014 roku w punkcie pomiarowym poniżej elektrowni Lisów wielkość azotu amonowego wyniosła $1,05 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, gdy azotu azotanowy (III) $<0,05 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i azotu azotanowego (V) – $0,509 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. W trakcie kolejnego pomiaru wykonanego w dniu 29.05.2014 roku na posterunku poniżej elektrowni Lisów, stężenie azotu amonowego wyniosło $1,42 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Dwa pozostałe wskaźniki chemiczne tj. azot azotanowy (III) i azot azotanowy (V) przyjmowały odpowiednio wartości $<0,05$ i $0,767 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Ostatni pomiar wykonany w dniu 13.06.2014 roku w tym samym punkcie co poprzednio, charakteryzował się stężeniem azotu amonowego na poziomie $0,54 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. W przypadku azotu azotanowego (III) jego wielkość wyniosła w tym dniu $<0,05 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, zaś azotu azotanowego (V) – $0,602 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Na rysunku 3 przedstawiono zmienność stężeń azotu amonowego w okresie od 20 maja do 13 czerwca 2014 roku w punkcie pomiarowym poniżej elektrowni Lisów, a na rysunku 4 krzywe dobowe przepływów.

Poza wykonaniem pomiarów przez WIOŚ na rzece Wąskiej, były one prowadzone także na Jeziorze Druzno na dwóch punktach pomiarowych. Ze względu na cel pracy uznano, że istotne są wyniki pomiarów z punktu zlokalizowanego w bliskim sąsiedztwie ujścia rzeki Wąskiej do jeziora. W dniu 27.05.2014 roku zanotowane stężenie azotu amonowego w wodach jeziora nie przekraczało $0,05 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Z kolei stężenie azotu azotanowego (III) i azotu azotanowego (V) wyniosło dla obu wskaźników $<0,05 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. W terminie 14.07.2014 roku stężenie azotu amonowego wyniosło $0,2 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, zaś azotu azotanowego (III) – $0,045 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i azotu azotanowego (V) – $0,38 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$.



Rys. 3 Stężenie azotu amonowego ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) w wodach rzeki Wąska w wybranych terminach po awarii w zakładzie „Sery” ICC Pasłęk

Fig. 3. The concentration of ammonia nitrogen ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) in the waters of the river Wąska in the selected dates after the accident at the plant “Sery” ICC Pasłęk



Rys. 4. Krzywa średniego przepływu dobowego na rzece Wąska ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) w okresie 20.05-13.06.2015 r. w wybranych terminach po awarii w zakładzie „Sery” ICC Pasłęk

Fig. 4. The curve of average daily flow on the river Wąska ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) in the period 20.05-13.06.2015 r. in the selected dates after the accident at the plant “Sery” ICC Pasłęk

Na podstawie uzyskanych wyników wysnuć można kilka wniosków. Po pierwsze w dniu 26.05.2014 roku, a więc około 5 dób od zrzutu azotu amonowego do rzeki Wąskiej jego stężenie było na poziomie pozwalającym na zaliczenie wód rzeki do II klasy czystości. Wskazuje to na dość szybkie przemieszczanie się zanieczyszczeń, pomimo że w tym czasie notowany przepływ był na poziomie niższym od średniego (SSQ). Również samooczyszczanie rzeki charakteryzuje się dużą dynamiką, co powodowało, że w dość krótkim czasie sytuacja wracała do wyjściowej przed awarią. Co istotne w okresie pomiarowym po początkowym obniżeniu stężenia azotu amonowego, w następnych terminach obserwowano fluktuacje uzyskanych wyników (przy jednostajnie zmniejszających się przepływach), co może wskazywać, że o zmienności decydowały warunki naturalne, tak jak to ma miejsce w przypadku choćby azotu azotanowego(V). Z kolei w punkcie pomiarowym na Jeziorze Druzno w kilka dni po awarii nie zanotowano istotnych zmian w jakości wody. Wzrosty stężeń azotu amonowego odnotowano następowywały w późniejszym okresie, co wskazuje na oddziaływanie warunków naturalnych, choćby takich jak bytowanie ptactwa wodnego, rozwój lub zanikanie biomasy itd.

4.3. Stan jakościowy wód analizowanych obiektów na podstawie badań własnych

Na podstawie badań wykonanych w dniu 20.02.2015 roku ustalono, że stężenie azotu amonowego w punkcie pomiarowym na Potoku Brzezinka przed

wlotem do rzeki Wąskiej (km 0+300) wynosiło $0,8 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, natomiast w punkcie w Węzinie na rzece Wąskiej tylko $0,2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Wartości te wskazują na duże tempo rozcieńczania i samooczyszczania rzeki Wąskiej. Co ważne wartości te są o wiele mniejsze od średniej dla lat 2012-2013 podawanej przez WIOŚ w Elblągu, która wynosi $1,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Również wartości azotu amonowego notowane w punkcie pomiarowym w Węzinie były o wiele wyższe w roku 2004 i 2007 niż ten zanotowany w lutym 2015 roku, gdzie wyniosły odpowiednio $0,69$ (2004 rok) i $1,45 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (2007 rok) oraz $0,2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (2015 rok).

4.4. Obliczenia stężeń azotu amonowego w ściekach w czasie zjawisk ekstremalnych

Niezwykle istotne znaczenie dla stanu jakościowego Wąskiej mają zjawiska ekstremalne, tym bardziej, że awaria która wystąpiła w 2014 roku była taką sytuacją. Dopuszczalne stężenie jakie może występować w ściekach odprowadzanych z zakładu „Sery” ICC Pasłek wynosi $10,0 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Przybylski i in. [18] opierając się na danych dla przepływów średnich (SSQ) z wielolecia podanych przez Drwala [4] oraz niskich (SNQ) podanych przez Pieniżek i in. [19] wyznaczyli zróżnicowanie stężeń azotu amonowego w ściekach przy maksymalnych wartościach stężeń ścieków z Zakładu w ogólnej ilości ścieków rzeki Wąskiej dla różnych przepływów. W efekcie ustalili, że przy przepływach SNQ i maksymalnych stężeniach w ściekach ($10 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) wielkość azotu amonowego na Potoku Brzezinka wynosi $7,18 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, zaś na rzece Wąskiej przy ujściu do Jeziora Druzno – $0,35 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Wzrosnie wtedy procentowy udział zanieczyszczeń Zakładu w ściekach rzeki Wąskiej, który wyniesie $44,69\%$. Z kolei przy przepływach SSQ wartość azotu amonowego na Potoku Brzezinka nie zmieni się i wyniesie $7,18 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Natomiast na rzece Wąskiej wartość ta gwałtownie obniży się do $0,05 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ azotu amonowego. Procentowy udział zanieczyszczeń Zakładu w ściekach rzeki Wąskiej zmniejszy się do wartości $6,40\%$.

4.5. Stężenia azotu amonowego w Brzezince w czasie wystąpienia awarii w dniu 19.05.2014r. na podstawie obliczeń

Stężenie ścieków w Brzezince, w czasie awarii było wynikiem wymieszania się wód Brzezinki, oczyszczonych ścieków zakładowych, oraz zrzutu wód lodowych. Wykorzystując wzór zlewniowej analogii hydrologicznej wyznaczone zostały przepływy rzeki Wąskiej oraz określone odpowiadające im natężenia przepływu w potoku Brzezinka, które wyniosły w dniu awarii $27 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (jest to ilość wód określana dla końcowego odcinka rzeki Brzezinka). W rzeczywistości w czasie awarii powyżej miejsca zrzutu oczyszczonych ścieków zakładowych przepływ wód Brzezinki, był bliski zeru. Należy zaznaczyć, że główne zasilanie w wody tego odcinka ma miejsce poprzez gwałtowne spływy z trasy S7 co nie miało miejsca, gdyż w dniu awarii nie było opadów. Badania z lutego 2015 roku potwierdzają powyższe informacje, gdyż przy braku opadów, przepływ w Brzezince powyżej miejsca zrzutu ścieków wyniósł ok. $0,3 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [18], co jest war-

tością znikomą w kontekście przepływów z oczyszczalni, a tym bardziej w czasie zrzutu wód lodowych.

Wartość $27 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ można uwzględnić przy wyznaczeniu przepływów dopiero na końcowym odcinku rzeki Brzezinki. Do obliczeń stężenia zanieczyszczeń przyjęto takie rozwiązanie. Wobec braku informacji o stężeniach zanieczyszczeń z wielolecia oraz analizując zlewnię rzeki przyjęto, że jej stan fizycznochemiczny będzie odpowiadał ilości substancji w rzece Wąskiej [18]. Tło zanieczyszczeń rzeki Brzezinki wynosić będzie, dla wartości maksymalnej amoniaku niejonowego $0,0823 \text{ mg NH}_3 \cdot \text{dm}^{-3}$ (azot amonowy $1,45 \text{ mg NH}_3 \cdot \text{dm}^{-3}$).

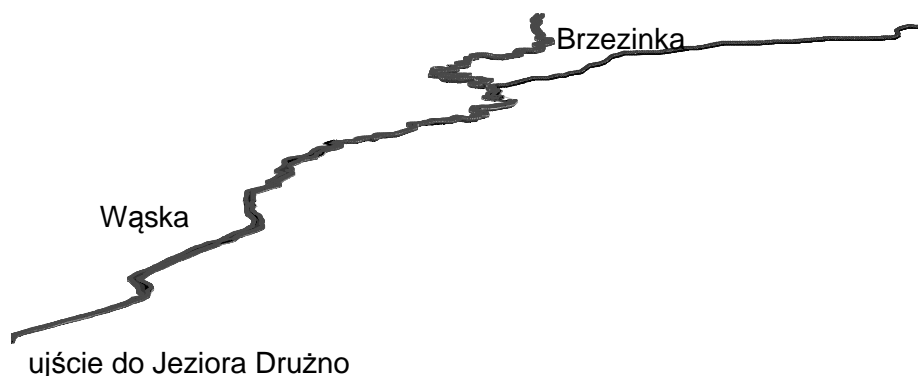
Stężenia zanieczyszczeń z oczyszczalni ścieków w chwili awarii nie są dokładnie znane aczkolwiek na pewno odbiegały od średnich parametrów stężeń zanieczyszczeń z wielolecia. Wiadomo jednak, iż w dniu 13 maja 2014r. doszło do zrzucenia 4 600 litrów śmietany. Spowodowało to zapewne znaczny spadek efektywności oczyszczania ścieków, co skutkowało podwyższonymi parametrami na wylocie z oczyszczalni do rzeki Brzezinki. Ocenia się, że odbudowa osadu czynnego mogła trwać przez kilkadziesiąt dni i zapewne pogorszone parametry oczyszczania były również w momencie zrzutu wody lodowej jak i długi czas po tym zdarzeniu. Zatem należy uznać, że pomiary z dnia 27 maja 2014r. są najbardziej zbliżone do stanu fizyczno-chemicznego ścieków podczas awarii w zakładzie [20]. Wyznaczono wtedy stężenia zanieczyszczeń, a przepływ ścieków wynosił $19 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wobec powyższego, poziom zanieczyszczenia amoniakiem niejonowym wyniesie $0,959 \text{ mg NH}_3 \cdot \text{dm}^{-3}$.

Do wody lodowej, w najgorszym wariantcie, przedostało się 300 kg amoniaku [21]. Temperatura wody wynosiła $1-3^\circ\text{C}$, a pH dla wody lodowej wynosi 7. Roztwór zawierał 540 m^3 wody zanieczyszczonej amoniakiem. W związku z tym, że amoniak bardzo łatwo rozpuszcza się w wodzie [22], zakłada się, że uległ rozpuszczeniu w całości. Wobec tego stężenie amoniaku w rzece Brzezince, w przeliczeniu na azot amonowy wynosiło $128,78 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Z kolei stężenie niejonowej formy azotu w rzece Brzezince, w czasie awarii wynosiło maksymalnie $34,61 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ przy przepływie $72,66 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz przy $\text{pH} = 9,24$ i $\text{temp.} = 8,33^\circ\text{C}$.

4.6. Hydrauliczne obliczenia migracji amoniaku

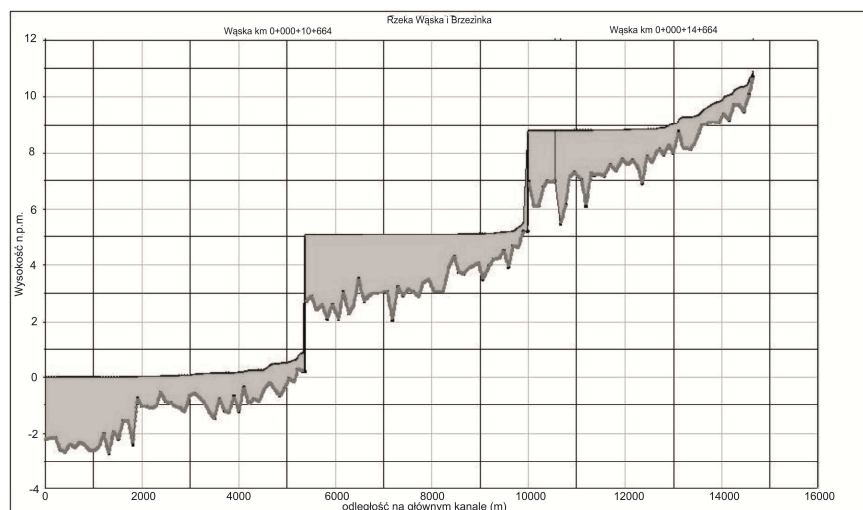
W obliczeniach odtworzono sieci cieków wraz z ich węzłami połączeniowymi oraz ich geodezyjne położenie w terenie [23, 24]. Wykorzystane zostały dane dotyczące geometrii przekrojów poprzecznych pozyskane z dokumentacji projektowej, mapy topograficznej oraz sytuacyjno-wysokościowej. Uwzględniono 143 przekroje w odstępach 100m. Zestawione zostały także dane dotyczące współczynnika oporów, który określono zgodnie z formułą Manninga [25]. Dodatkowo wyznaczone zostały przekroje pośrednie (co 20 m) na drodze interpolacji geometrycznej, którą umożliwia program HEC-RAS, a którą opisał m.in. Leonard [26, 27]. Uzyskany profil podłużny rzeki Wąskiej przedstawiono na rysunku 5.

Następnie wykonane zostały obliczenia hydrauliczne dla rozkładu przepływów obliczonych w dniu 19 i 20 maja 2014r. oraz dwóch wariantów zrzutu ścieków przyjmując średnie dobowe natężenia przepływu wody w rzece Wąskiej, potoku Brzezinka oraz w miejscu dopływu ścieków do odbiornika. Wyniki położenia zwierciadła wody dla przyjętego rozkładu przepływów przedstawiono na profilu rzeki Wąskiej (rys. 6), a wyniki rozkładu prędkości (w zestawieniu z przepływami charakterystycznymi SNQ i SSQ) na rysunku 7.



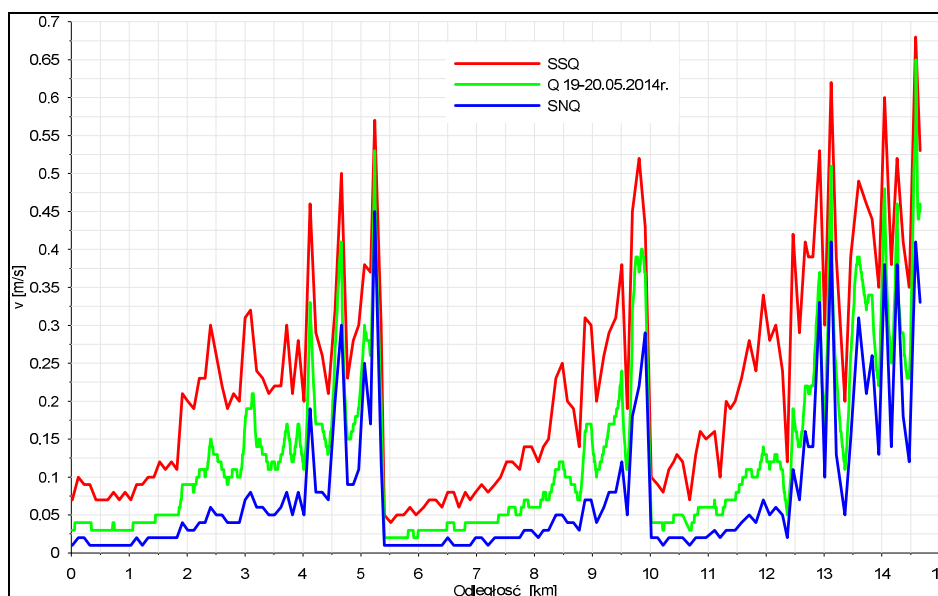
Rys. 5. Model numeryczny odcinka rzeki Wąskiej oraz odcinka potoku Brzezinka utworzony w programie HEC-RAS

Fig. 5. The numerical model of stretch of the river Wąska and stretch Brzezinka Stream created in HEC-RAS



Rys. 6. Położenie zwierciadła wody dla przyjętych przepływów w profilu rzeki Wąska – wyniki obliczeń hydraulicznych

Fig. 6. The position of the water table for the accepted flow profile river Wąska – the results of hydraulic calculations



Rys. 7. Rozkład prędkości średniej dla przyjętego rozkładu przepływów w dniu 19 i 20 maja na tle przepływu miarodajnego SSQ oraz SNQ w profilu rzeki Wąska – wyniki obliczeń hydraulicznych

Fig. 7. Distribution of average speed for the assumed distribution of flows on 19 and 20 May against the flow of authoritative SSQ and SNQ in profile river Wąska – the results of hydraulic calculations

4.7. Wyniki stężeń amoniaku na podstawie obliczeń modelowych

Przeprowadzono analizę migracji amoniaku jako substancji rozpuszczonej, biernej i nierozkładalnej w warunkach nieustalonych dla ustalonych warunków przepływu w dniu 19 i 20 maja 2014 r., rozwiązując numerycznie jednowymiarowe równanie nieustalonego transportu substancji rozpuszczonej. Do rozwiązania zastosowano moduł jakości wody w programie HEC-RAS. Moduł ten wykorzystuje wyniki obliczeń hydraulicznych uzyskane za pomocą modułu hydraulicznego, nawiązując do zdefiniowanych tam przekrojów obliczeniowych [28]. Wyniki te wykorzystane zostały jako dane wejściowe do badania rozkładu zanieczyszczeń w wodach Wąskiej i Brzezinki.

W module jakości wody programu HEC-RAS przyjęto odpowiednie warunki graniczne. Jako warunek początkowy przyjęto zerowo stężenie amoniaku w każdym z cieków. Zrzut ścieków z oczyszczalni został odtworzony przez włączenie dopływu bocznego w ilości wód zrzucanych z Zakładu do wód Brzezinki. Przyjęto dwa scenariusze zrzutu utworzone na podstawie opisu przebiegu awarii [23, 24]. Zgodnie z nim, rozszczelnienie instalacji z amoniakiem oraz jego wyciek do wody lodowej mógł wystąpić pomiędzy godziną 0⁰⁰ a 4⁰⁰ w nocy z 18/19 maja 2014 r. Jak wynika z opracowania [21], możliwe były trzy scenariusze

awarii, a uwolniona masa amoniaku mogła wynieść w sumie od 8,4 do 300 kg. Wyciek powstał w jednym ze zbiorników wody lodowej o pojemności 180 m³. W dniu 19 maja zrzucano wodę ze zbiorników wody lodowej poprzez system kanalizacji deszczowej do potoku Brzezinka. Zrzut rozpoczęto ok. godz. 14⁰⁰ a zakończono ok. godz. 21⁰⁰. W tym czasie opróżniono 3 zbiorniki wody lodowej, po 180 m³ każdy (w sumie zrzucano 540 m³ wody). Następnie w dniu 20 maja 2014 r. rozpoczęto dopłukiwanie instalacji, a woda była odprowadzana od ok. godz. 9⁰⁰ do ok. godz. 14⁰⁰. W tym czasie przepłukano 2 zbiorniki zrzucając dodatkowo 360 m³ wody, z niewielkimi ilościami amoniaku (po płukaniu zbiorników).

Do symulacji przyjęto następujące dwa, najmniej korzystne scenariusze. W pierwszym założono, że amoniak do wód Brzezinki dostał się wraz z wodami zrzucanymi w dniu 19 maja. Przyjęto największe jego stężenie wynikające z maksymalnej ilości (300 kg), jaka mogła dostać się do wody lodowej [21]. W sumie daje to stężenie ok. 439,81 mg NH₃·dm⁻³ – i takie stężenie przyjęto w zrzucanej wodzie w ciągu 9 godzin, od 14⁰⁰ do 23⁰⁰. Zrzut wód z dopłukiwania potraktowano jako zrzut wód o znikomym małym stężeniu, (scenariusz nr 1). Po wymieszaniu z wodami Brzezinki, dla zadanego rozkładu przepływów w dniu 19 i 20 maja 2014 r. stężenie amoniaku wyniosło 128,78 mg NH₃·dm⁻³.

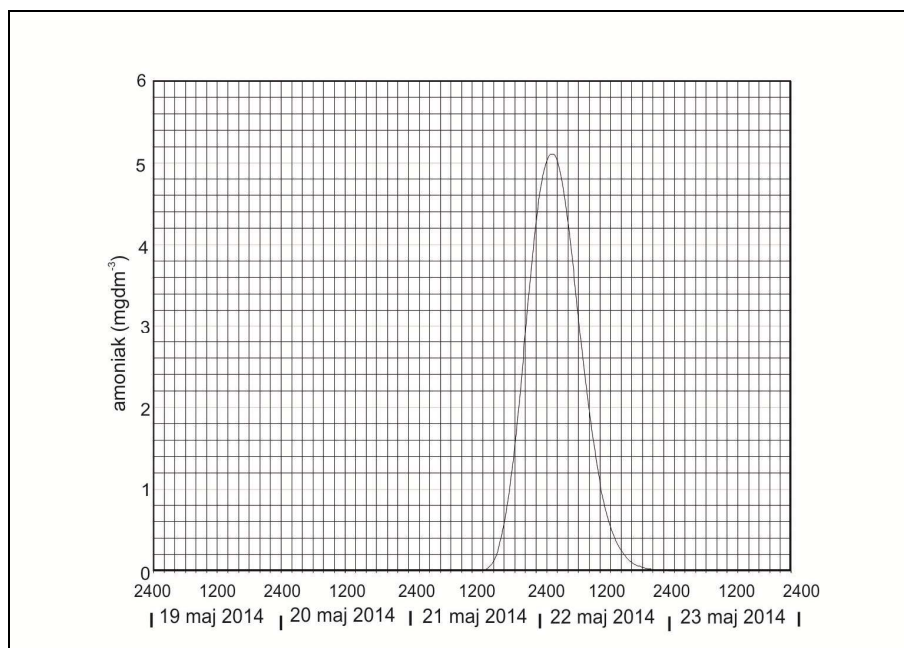
W drugim scenariuszu przyjęto identyczne założenia jak w pierwszym co do zrzutu w dniu 19 maja oraz założono mało prawdopodobną sytuację, ale najmniej korzystną z punktu widzenia zagrożenia środowiska, że w czasie zrzutu wód z dopłukiwania zbiorników w dniu 20 maja stężenie amoniaku w wodzie wyniosło 439,81 mg NH₃·dm⁻³.

Następnie przeprowadzono obliczenia numeryczne propagacji fali wód zanieczyszczonych amoniakiem dla obliczonego rozkładu przepływów w dniu 19 i 20 maja dla dwóch przyjętych i omówionych powyżej scenariuszy zrzutu. Przeprowadzone obliczenia umożliwiły śledzenie w czasie zmian stężenia amoniaku wzdłuż rzeki Wąskiej, co pozwoliło na określenie czasu przemieszczenia fali zawierającej zanieczyszczenia danego przekroju charakterystycznego. Wyniki te w postaci graficznej przedstawiono w postaci zmian stężeń amoniaku w wodach rzeki Wąskiej w charakterystycznym przekroju w miejscu ujścia do Jeziora Druzno dla obu wariantów obliczeniowych (rys. 8, rys. 9).

W przypadku zrzutu wód lodowych zanieczyszczonych amoniakiem wg scenariusza nr 1 (pojedyncza fala zanieczyszczeń) przebieg propagacji fali zanieczyszczeń w wodach rzeki Wąskiej zależy od warunków przepływu panujących wzdłuż poszczególnych cieków, co potwierdzają badania Krukowskiego [29] dla rzeki Wkra. W rzece Wąskiej oraz potoku Brzezinka, stężenie po wprowadzeniu wód zanieczyszczonych do wód Brzezinki wynosi ok. C=128,78 mg NH₃·dm⁻³. Do stopnia „Krosno” (km 9+959) możliwe jest przemieszczenie fali zawierającej amoniak, która dotarła około godz. 21⁰⁰ tego samego dnia i osiągnęła maksymalne stężenie C=6,92 mg·dm⁻³, a następnie spadła do wartości bliskiej zeru ok. godz. 14³⁰ 20.05.2014 r. W przekroju stopnia wod-

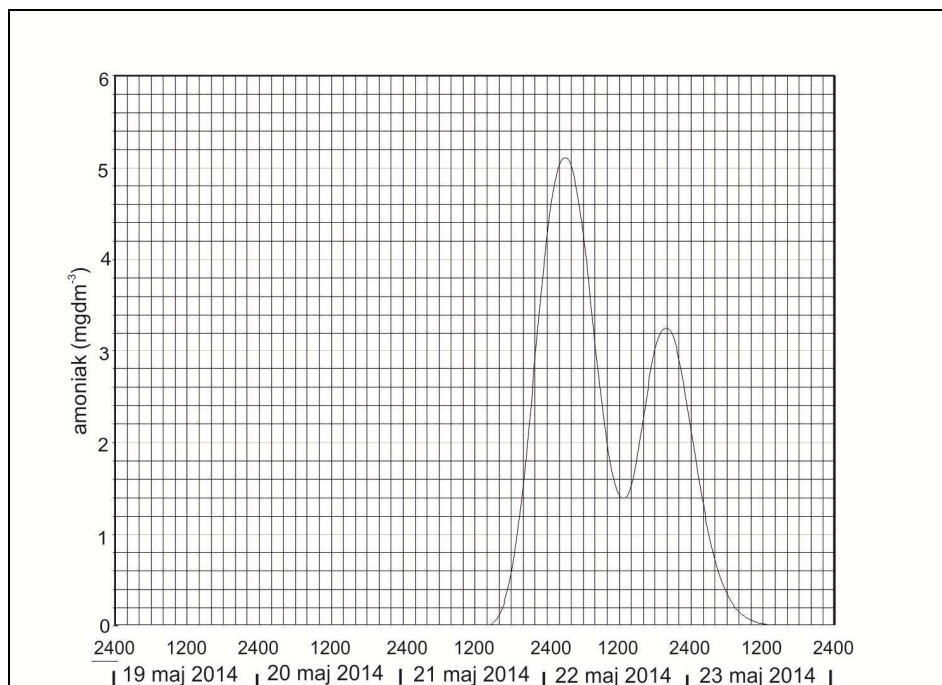
nego „Družno” (km 5+396) amoniak można odnotować ok. godz. 19³⁰ 20.05.2014 r. i osiąga maksymalne stężenie $C=5,66 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, a spada do wartości bliskiej zero około godz. 23⁰⁰ 21.05.2014 r. Możliwe przemieszczenie wód zanieczyszczonych amoniakiem do Jeziora Družno, które można oszacować ok. 14⁰⁰ 21.05.2014 r. na $C=5,11 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, zaś około północy z 22/23.05.2014 r. spadają do wartości bliskiej zero.

W przypadku zrzutu wód lodowych zanieczyszczonych amoniakiem wg scenariusza nr 2 (dwie fale zanieczyszczeń) w rzece Wąskiej oraz potoku Brzezinka, stężenie po wprowadzeniu wód zanieczyszczonych do wód Brzezinki wynosi ok. $C=130 \text{ mg NH}_3\cdot\text{dm}^{-3}$. Czoło pierwszej fali zanieczyszczeń, których zrzut rozpoczęto 19 maja ok. godz. 14, do elektrowni „Krosno” (km 9+959) osiągnęło maksymalne stężenie $C=6,92 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ok. godz. 21⁰⁰ tego samego dnia i osiąga. Druga fala zanieczyszczeń, których zrzut rozpoczęto 20 maja ok. godz. 9⁰⁰, do elektrowni „Krosno” (km 9+959) osiągnęło maksymalne stężenie ok. $C=6,50 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ok. godz. 14⁰⁰ 20.05.2014 r. I już praktycznie tu, przed zaporą elektrowni „Krosno”, dochodzi do połączenia z pozostałością amoniaku z pierwszej fali zanieczyszczeń, w zasięgu cofki wywołanej stopniem piętrzącym „Krosno”. Stężenie amoniaku w rejonie elektrowni „Krosno” spada do wartości bliskiej zero ok. godz. 6⁰⁰ 21.05.2014 r.



Rys. 8. Zmiana stężenia amoniaku na ujściu Wąskiej do Jeziora Družno, wariant nr 1

Fig. 8. Changing the concentration of ammonia at the river Wąska mouth to Lake Družno, option 1



Rys. 9. Zmiana stężenia amoniaku na ujściu Wąskiej do Jeziora Druzno, wariant nr 2

Fig. 9. Changing the concentration of ammonia at the river Wąska mouth to Lake Druzno, option 2

W przekroju stopnia wodnego „Druzno” (km 5+396) dochodzi już do połączenia obu fal, a maksymalne stężenie amoniaku $C=5,66 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ występuje ok. godz. 19³⁰ 20.05.2014 r. a następnie spada do wartości bliskiej zeru ok. godz. 15⁰⁰ 22.05.2014 r. Do Jeziora Druzno wody zanieczyszczone amoniakiem odpowiadają się ok. 14⁰⁰ 21.05.2014 r., gdzie amoniak osiąga maksymalne stężenie $C=5,11 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, by ok. godz. 10⁰⁰ 23.05.2014 r. spaść do wartości bliskiej zeru.

Całkowity ładunek amoniaku z rzeki Brzezinki przepływał rzeką Wąską przez maksymalnie 44 godziny. Powyższe oznacza, że w dniu 23.05.2014 r. około godziny 12.00 w południe nie było już w rzece amoniaku pochodzącego z zanieczyszczonej wody lodowej.

W przypadku zrzutu wód lodowych zanieczyszczonych amoniakiem wg scenariusza nr 2 (dwie fale zanieczyszczeń) w rzece Wąskiej oraz potoku Brzezinka, stężenie po wprowadzeniu wód zanieczyszczonych do wód Brzezinki wynosi ok. $C=130 \text{ mg NH}_3 \cdot \text{dm}^{-3}$. Czoło pierwszej fali zanieczyszczeń, których zrzut rozpoczęto 19 maja ok. godz. 14, do elektrowni „Krosno” (km 9+959) osiągnęło maksymalne stężenie $C=6,92 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ok. godz. 21⁰⁰ tego samego dnia i osiąga. Druga fala zanieczyszczeń, których zrzut rozpoczęto 20 maja ok. godz. 9⁰⁰, do elektrowni „Krosno” (km 9+959) osiągnęło maksymalne stężenie ok. $C=6,50 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ok. godz. 14⁰⁰ 20.05.2014 r. I już praktycznie tu, przed za-

porą elektrowni „Krosno”, dochodzi do połączenia z pozostałością amoniaku z pierwszej fali zanieczyszczeń, w zasięgu cofki wywołanej stopniem piętrzącym „Krosno”. Stężenie amoniaku w rejonie elektrowni „Krosno” spada do wartości bliskiej zeru ok. godz. 6⁰⁰ 21.05.2014 r. W przekroju stopnia wodnego „Drużno” (km 5+396) dochodzi już do połączenia obu fal, a maksymalne stężenie amoniaku $C=5,66 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ występuje ok. godz. 19³⁰ 20.05.2014 r. a następnie spada do wartości bliskiej zeru ok. godz. 15⁰⁰ 22.05.2014 r. Do Jeziora Drużno wody zanieczyszczone amoniakiem odnotowuje się ok. 14⁰⁰ 21.05.2014 r., gdzie amoniak osiąga maksymalne stężenie $C=5,11 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, by ok. godz. 10⁰⁰ 23.05.2014 r. spaść do wartości bliskiej zeru

Całkowity ładunek amoniaku z rzeki Brzezinki przepływał rzeką Wąską przez maksymalnie 44 godziny. Powyższe oznacza, że w dniu 23.05.2014 r. około godziny 12.00 w południe nie było już w rzece amoniaku pochodzącego z zanieczyszczonej wody lodowej.

4.8. Przemiany amoniaku w rzece Wąskiej

W wodach powierzchniowych świeżo zanieczyszczonych np. ściekami bytowymi, azot występuje głównie w formie organicznej. W wodzie następuje rozkład białka do amoniaku. Jeśli w rzece panują warunki aerobowe, zachodzi proces nitryfikacji a jony amonowe ulegają w środowisku aerobowym utlenieniu. Sama nitryfikacja to proces utleniania amoniaku i soli amonowych do azotanów prowadzony przez bakterie nitryfikacyjne. Optymalna dla nitryfikacji wartość pH mieści się w zakresie 6,5 – 8,0 [30]. Szybkość procesu nitryfikacji zależy w głównej mierze od temperatury. Reiman badając nitryfikację ścieków stwierdził, że szybkość utleniania azotu amonowego wynosi $0,102 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3} \text{ N-NH}_4$ na godzinę w temperaturze 15°C oraz $0,26 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3} \text{ N-NH}_4$ na godzinę w temperaturze 30°C [30]. Powyższe zgodne jest również z badaniami Groenewag i in. [31]. Do obliczeń przyjęto, szybkość utleniania azotu amonowego w odniesieniu do temperatury w wysokości $0,123 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3} \text{ N-NH}_4$.

Procesy nitryfikacji mogą mieć istotny wpływ na zmiany zawartości tlenu w rzece. Sumarycznie w procesie nitryfikacji zużywa się 4,33 mg tlenu na 1 mg azotu (z czego 3,22 mg tlenu na utlenienie azotu amonowego, 1,11 mg tlenu na utlenienie azotanów [30]. Wyniki próbek WIOŚ nie wskazują aby w rzece pomiędzy 20.05.2014 r. a 13.06.2014 r. panowały warunki odbiegające od normy – stężenie rozpuszczonego tlenu utrzymywała się pomiędzy $5,2\text{-}5,8 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3} \text{ O}_2$.

W niniejszym badaniu przyjęto, że czas przepływu ścieków wynosił:
do Stopnia wodnego Krosno (9+959) 7 godzin,
do Stopnia wodnego Drużno (5+396) 24,5 godziny ,
do Jeziora Drużno (0+013) 50 godzin.

Zanieczyszczenia amoniaku z Brzezinki, niosące ładunek azotu wynikający ze zrzutu wód lodowych oraz z pozostałych źródeł jak oczyszczalnia zakładowa nigdy nie dotarły do Jeziora Drużno. Uległy bowiem przede wszystkim nitryfikacji na odcinku pomiędzy km 5+396 a 0+013. Na odcinku od km 10+637 do

5+396 poziom zanieczyszczeń azotem amonowym zmienił w znacznym stopniu odczyn rzeki, a maksymalne stężenia zanieczyszczeń utrzymywały się od 2 do 4 godzin.

5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników i analiz wyciągnąć można kilka istotnych wniosków.

1. Całkowity ładunek amoniaku z rzeki Brzezinki utrzymywał się w rzece Wąskiej przez maksymalnie 50 godzin.
2. Obliczenia wskazują, że w dniu 23.05.2014r. około godziny 12.00 w południe nie było już w rzece amoniaku pochodzącego z zanieczyszczonej wody lodowej.
3. Wyniki badań laboratoryjnych Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska z dnia 20.05.2014r. zebrane w miejscu poniżej elektrowni Druzno (profil Lisów) (WIOŚ 2014) wskazują, zawartość azotu amonowego w rzece była na poziomie nieznacznie wyższym od maksymalnej z wielolecia tj. $1,47 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (wobec $1,45 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$). W tym czasie nie było tam jeszcze wód zanieczyszczonych wodami lodowymi.
4. Maksymalne stężenia azotu amonowego występowały w okresie od 2 do 4 godzin.
5. Hydrologicznie rzeka Wąska ma zdolności znacznego samooczyszczania i to spowodowało, że zanieczyszczenie mogło wywołać efekt letalny dla organizmów wodnych części rzeki, ale i lokalny bowiem czoło fali zanieczyszczeń nie osiągnęło ujściowego odcinka rzeki ani Jeziora Druzno
6. Rzeka Wąska dość szybko powróciła do stanu pierwotnego. Świadczą o tym odnotowane stężenia w wodach rzeki tuż przed wpłynięciem do Jeziora Druzno, a także w wodach samego jeziora oraz wyniki badań laboratoryjnych w okresie kilku, kilkunastu dni po awarii.

W efekcie można stwierdzić, że zanieczyszczenia jakie wprowadzone zostały poprzez rzekę Brzezinkę do Wąskiej miały charakter lokalny. Zatem należy wykluczyć stan kłęski ekologicznej tego regionu. Spowodowały one „uszczerbek” pewnych form życia biologicznego m.in. ryb, ale tylko w górnym i środkowym odcinku rzeki Wąskiej.

Literatura

- [1] Environmental Assessment and Restoration Bureau of Laboratories: Tallahassee, Florida 2001.
- [2] Thurston R.V., Russo R.C., Emerson K.: *Aqueous Ammonia Equilibrium Calculations*, Technical Report, No. 74-1, Fisheries Bioassay Laboratory, Montana State University 1974.
- [3] Drwal J. (red.): *Basen Jeziora Druzno. Regionalny system przyrodniczo-techniczny*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 1991.

- [4] Drwal J. (red): *Wody Delt Wisły, część wschodnia*, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk 2002.
- [5] Cieśliński R.: *Rola niecki jeziora Druzno w transformacji odpływu z druznieńskiego systemu hydrograficznego*, [w:] J. Drwal (red.), *Wody delty Wisły – część wschodnia*, GTN, Gdańsk 2002, s. 95-109.
- [6] Cieśliński R.: *Komentarz do mapy hydrograficznej w skali 1:50000, arkusz N-34-63-D Elbląg-Płd.*, Z.U.G.I.K. PRYZMAT, Częstochowa 2007.
- [7] Dębowski P.: *Ichtiofauna dorzecza Wąskiej*, Rocz. Nauk. PZW, nr 9, 1996, s. 37-50.
- [8] Radtke G., Bernaś R., Dębowski P., Skóra M.: *Ichtiofauna dorzecza rzeki Elbląg*, Rocz. Nauk. PZW, nr 24, 2011, s. 97-114.
- [9] Augustowski B. (red.): *Żuławy Wiślane*, Wyd. GTN, Gdańsk 1976.
- [10] Cebulak K.: *Delta Wisły powyżej i poniżej poziomu morza*, Wyd. Stowarzyszenie Żuławy i Lokalna Grupa Działania Żuławy i Mierzeja, Nowy Dwór Gdański 2010.
- [11] Fac-Beneda J.: *Charakterystyka hydrologiczna jeziora Druzno*, [w:] Cz. Nitecki (red.), *Jezioro Druzno - Monografia Przyrodnicza*, Wyd. Mantis, Olsztyn 2013, s. 15-31.
- [12] Krajewski Z. (red.): *Raport o stanie środowiska województwa warmińsko-mazurskiego w 2004 roku*, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Olsztyn 2005.
- [13] Budzyńska D. (red.): *Raport o stanie środowiska województwa warmińsko-mazurskiego w 2007 roku*, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Olsztyn 2008.
- [14] Budzyńska D. (red.): *Raport o stanie środowiska województwa warmińsko-mazurskiego w 2012 roku*, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Olsztyn 2013.
- [15] Drwal J., Cieśliński R.: *Ocena możliwości wpływu zanieczyszczeń punktowych i obszarowych oraz wlewów odmorskich na jakość wód jeziora Druzno*, [w:] W. Lange i D. Borowiak, *Zagrożenia degradacyjne a ochrona jezior*, Wyd. DJ, Gdańsk 1998, s. 93-105.
- [16] Bogdanowicz R.: *Transport biogenów w druznieńskim systemie hydrograficznym*, [w:] J. Drwal (red.), *Wody delty Wisły*, GTN, Gdańsk 2002, s. 65-82.
- [17] Bogdanowicz R.: *Hydrologiczne uwarunkowania transportu wybranych związków azotu i fosforu Odrą i Wisłą oraz rzekami Przymorza do Bałtyku*, Wyd. UG, Gdańsk 2004.
- [18] Przybylski M., Pranga J., Łyko M., Sawicka D.: *Wpływ Zakładów SERY ICC PA-SŁĘK na ekosystemy wodne potoku Brzezinka Rzeki Wąska oraz formy ochrony przyrody J. Druzno*, Biuro Projektów Środowiskowych, Gdańsk (maszynopis) 2015.
- [19] Pieniążek A., Felinczak E., Felinczak M.: *Przebudowa koryta rzeki Wąska – DOKUMENTACJA PROJEKTOWA*. Operat wodno-prawny, Biuro Projektowo – Consultingowe HydroEco, Gdańsk (maszynopis) 2011.
- [20] Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Olsztynie Delegatura w Elblągu – sprawozdanie nr 173/2014/PEI z dnia 03.06.2014 (maszynopis).
- [21] Kwidziński R., Mizera G.: *Obliczenia masy amoniaku uwolnionego podczas wycieku do wody lodowej*, Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego PAN, Gdańsk (maszynopis) 2015.
- [22] Francis-Floyd R., Watson C., Petty D., Poudier D.B.: *Ammonia in Aquatic Systems*, Department of Fisheries and Aquatic Sciences, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida 1990.

- [23] Zima P.: *Modelowanie procesu transportu zanieczyszczeń w rzece Wąskiej pod kątem zrzutu ścieków z zakładu mleczarskiego Sery ICC Pasłęk Sp. z o.o. w Pasłęku*, Gdańsk (maszynopis) 2014a.
- [24] Zima P.: *Modelowanie procesu transportu zanieczyszczeń w rzece Wąskiej pod kątem niekontrolowanego zrzutu amoniaku w dniu 19 maja 2014r. z zakładu mleczarskiego Sery ICC Pasłęk Sp. z o.o. w Pasłęku*, Gdańsk (maszynopis) 2014b.
- [25] Marivoet J.L., van Craenenbroeck W.: *Longitudinal dispersion in shipcanals*, Journal of Hydraulic Research, vol. 24, no 2, 1986, pp. 123-132.
- [26] Leonard B.P.: *A Stable and Accurate convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 19, 1979, pp. 59-98.
- [27] Leonard B.P.: *The ULTIMATE Conservative Difference Scheme Applied to Unsteady One-Dimensional Advection*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 88, 1991, pp. 17-74.
- [28] HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, US Army Corps of Engineers, Davis 1997.
- [29] Krukowski M.: *Porównanie wartości współczynników dyspersji zanieczyszczeń pasywnych wyznaczonych z pomiarów na rzece Wkrze z obliczeniami zależności empirycznych*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, nr 1, z. 24, 2002, s. 228-239.
- [30] Dojlido J.: *Chemia wód powierzchniowych*, Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok 1995.
- [31] Groenewag J., Sellner B., Tappe W.: *Ammonia oxidation in nitrosomonas at NH₃ concentrations near K_m: Effects of pH and temperature*, Water Research, vol. 28, no 12, 1994, pp. 2561-2566.

HYDROCHEMICAL ASSESSMENT OF ECOLOGICAL DISASTER ON THE LAKE DRUZNO AND RIVER WĄSKA IN 2014

S u m m a r y

The aim of the study is to assess hydrochemical impact of pollution, which fall into the days 19-20.05. 2014 to the river Wąska and Lake Druzno and determine is it ecological disaster. With Lake Druzno has landed this time, about 2 tons of dead fish, including species that are protected, and small aquatic organisms such as snails and clams. State institutions have recognized that the cause of this state of affairs was the flow of pollution from the plant Sery ICC Pasłęk. The main work consisted of the query source materials and the field and laboratory work. In 2015, we have been sampling water from the river Wąska and Lake Druzno, which were then analyzed for determining the concentrations of indicators such as nitrates, nitrites, ammonia. Also made modeling the transport of pollutants in the river Wąska using HEC-RAS. As a result, it was found that contaminants have entered the narrow river were local in nature and in no case cannot talk about the ecological disaster in the region.

Keywords: pollution, quality, ammonia, transportation

Przesłano do redakcji: 2.10.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Adam RYBKA¹
Marta JAŃCZUK²
Klaudia JAREMA-KUŚNIERZ³
Jaime ROSET CALZADA⁴

KSZTAŁTOWANIE WYSOKICH OBIEKTÓW ARCHITEKTURY W TKANCIE MIEJSKIEJ RZESZOWA

Kwestia kształtowania wysokiej architektury w przestrzeni miejskiej jest obecna w architekturze, urbanistyce i naukach społecznych od początku XX wieku do współczesności. Odniesienia do tej idei są widoczne do dziś w praktyce i teorii architektury w projektach budynków oraz w publikacjach. Artykuł omawia temat opisujący ideę kształtowania wysokiej architektury w przestrzeni miejskiej. Dwa przykłady projektów wysokich budynków w Rzeszowie zostały opisane. Próba odpowiedzi na pytanie czy kształtowanie wysokich obiektów architektury w zabudowie miejskiej Rzeszowa jest uzasadnione przestrzennie. Ukazanie kształtowania wysokich obiektów architektury w zabudowie miejskiej Rzeszowa na dwóch przykładach - jako odpowiedź na potrzeby miasta. Poruszenie problemu trwałości konstrukcyjnej i technologicznej, Kształtowania formy obiektu w oparciu o wybrane rozwiązania konstrukcyjne, optymalizację bryłową zastosowanych rozwiązań. Dwa przykłady architektoniczne zależne od miejsca lokalizacji w dwóch różnych miejscach środowiska miejskiego Rzeszowa, stanowią przeciwwagę niestałości powtarzalnych rozwiązań.

Słowa kluczowe: architektura obiektów biurowych i hotelowych, formowanie bryły, trwałość konstrukcji, środowisko miejskie, Rzeszów

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Adam Rybka, Politechnika Rzeszowska, Zakład Urbanistyki i Architektury, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. 178651624, akbyr@prz.edu.pl

² Marta Jańczuk, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. 661182934, martajanczuk@gmail.com

³ Klaudia Jarema-Kuśnierz, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. 664028004, klaudijarema@gmail.com

⁴ Jaime Roset Calzada, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, Diagonal, 649, 08028 Barcelona, Hiszpania, tel. 0034 696 570 985, jaimros@gmail.com

1. Wstęp

Rzeszów znajduje się w grupie dynamicznie rozwijających się polskich miast. Jego atutem jest położenie geograficzne. Miasto jest ważnym punktem na mapie Europy. Tu krzyżują się trakty drogowe: międzynarodowe trasy Drezno-Kijów oraz drogi krajowe nr 9 i 19, umożliwiające najkorzystniejsze połączenie krajów skandynawskich i nadbałtyckich z państwami Europy Środkowo-Wschodniej. Realizowana autostrada A-4 zapewni dogodne połączenie sieci dróg Europy Zachodniej z Ukrainą. Bardzo dużym atutem Rzeszowa jest Międzynarodowy Port Lotniczy Rzeszów Jasionka, dysponujący drugim pod względem długości w Polsce pasem startowym. Rzeszów posiada regularne połączenia lotnicze z znaczącymi miastami europejskimi [4].

Biorąc pod uwagę dynamiczny rozwój Rzeszowa uzasadnione jest projektowanie, na jego obszarze, budynków wysokich. Związane jest to z naturalnym ograniczeniem powierzchni terenów śródmiejskich dostępnych pod zabudowę. Istnieje tutaj zwarta zabudowa, dlatego mamy nie wiele potencjalnej przestrzeni do zagospodarowania. W związku z tym względy ekonomiczne i techniczne zmuszają inwestorów, a wraz z nimi projektantów, do stawiania coraz wyższych obiektów [2]. Dodatkowo grunty miejskie mają wysoką cenę, dlatego inwestorzy preferują wybudowanie wysokiego budynku na niewielkiej działce. Są to czynniki skłaniające do piętrzenia budynków w górę.

Budynki wysokie są projektowane dla dość ograniczonego zakresu funkcji. Ponad 80% wieżowców to budynki biurowe, kilka procent to hotele i mieszkaniowe. Niekiedy budynki tego typu pełnią funkcje mieszkaniowo-biurowo-hotelowe, rzadko wyłącznie funkcje mieszkaniowe [1].

Budynki wysokościowce podkreślają prestiż miasta i pokazują jego sprawność i atrakcyjność gospodarczą. Taka zabudowa jest często wizytówką miasta. Przyciąga biznesmenów oraz inwestorów pragnących prowadzić swoje interesy w danym mieście.

Krajobraz Rzeszowa kształtował się przez stulecia, rozwijając swoje pewne charakterystyczne cechy. Lokalizacja oraz forma akcentów wieżowych i wysokościowych, widocznych w sylwecie miasta wynikała ze specyficznych zasad kodu kształtowania przestrzeni. Współczesne budynki wysokościowe mają inny charakter, odmienną funkcję i formę, a także odmienne są zasady ich lokalizacji w strukturze miasta. Wpływ budynków wysokościowych wiąże się z ich dużym zasięgiem oddziaływania wizualnego w sylwecie miasta. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do wartościowych widoków miasta, które powinny być chronione z uwagi na swoje walory kulturowe i historyczne.

Od kilku lat toczy się dyskusja na temat wysokości zabudowy w Rzeszowie. Jedni uważają, że w Rzeszowie wieżowce są niepotrzebne i historycznie nieuzasadnione, inni widzą w nich symbol nowoczesności i metodę optymalizacji zagospodarowania przestrzeni miejskiej.

Budynki wysokościowe są wyróżnikiem nowoczesnej gospodarki. Powinny powstawać pod warunkiem, że nie naruszają ładu przestrzennego w mieście i tworzą przemyślaną kompozycję. Ostatnie lata przyniosły silną tendencję realizacji w Rzeszowie budynków wysokościowych. Niektóre propozycje są bardzo interesujące. Aby jednak dobrze spełniły swoją rolę potrzebne są szczegółowe studia i analizy architektoniczne i urbanistyczne wizerunku śródmieścia Rzeszowa [3].

Formy budynków wysokich stają się coraz bardziej skomplikowane przestrzennie, zaskakują urodą i elegancją. Współczesnej technologii takich budynków towarzyszy nurt działań proekologicznych oraz idea budynku inteligentnego. Wieżowce są źródłem postępu w dziedzinie techniki i technologii budowlanej. Wyższa klasa rozwiązań instalacyjnych, mechanicznych, przeciwpożarowych, większa szczelność i wytrzymałość ścian osłonowych powoduje, iż mogą one być, po modyfikacji, stosowane w zabudowie niższych budynków. Organizacja działania wieżowca, bezpieczeństwo wielu set czy tysięcy przebywających w nim ludzi, niezawodność rozwiązań technicznych sprawiają, iż nazwa „budynek inteligentny” jest najczęściej kojarzony z obiektami wysokimi [1].

Budynki wysokie tworzą nowy „drugi poziom” miasta, wzbogacają formę jego przestrzeni, zaskakują wydobytą przez światło sztuczne geometrią w nocy.

Struktura konstrukcyjna budynku wysokościowego powinna zapewnić bezpieczeństwo budynku oraz jego otoczenia. Oznacza to odpowiednią: stateczność, sztywność przestrzenną, wytrzymałość elementów i złączy, także trwałość oraz bezpieczeństwo pożarowe i sejsmiczne. Konstrukcja powinna równocześnie spełniać wymagania architektoniczne dotyczące szczególnie mobilności funkcji, dostępności komunikacji oraz łatwości transmisji przewodów instalacyjnych [1].

Przyjęta konstrukcja budynku jest istotnym czynnikiem kształtowania jego wyrazu architektonicznego. Architekt nie może dowolnie formować bryły takiego budynku. Zmuszony jest, w pewnym stopniu, podporządkować ją wymogom konstrukcyjnym. Duże ingerencje i modyfikacje w kształcie bryły na wyższych kondygnacjach mogą zagrażać stateczności budynku. Projektant musi uwzględnić te uwarunkowania i czynniki przy kształtowaniu wrażenia estetycznego bryły budynku. Wpływ na wygląd budynku oprócz konstrukcji ma również funkcja, lokalizacja oraz charakterystyka otaczającego terenu.

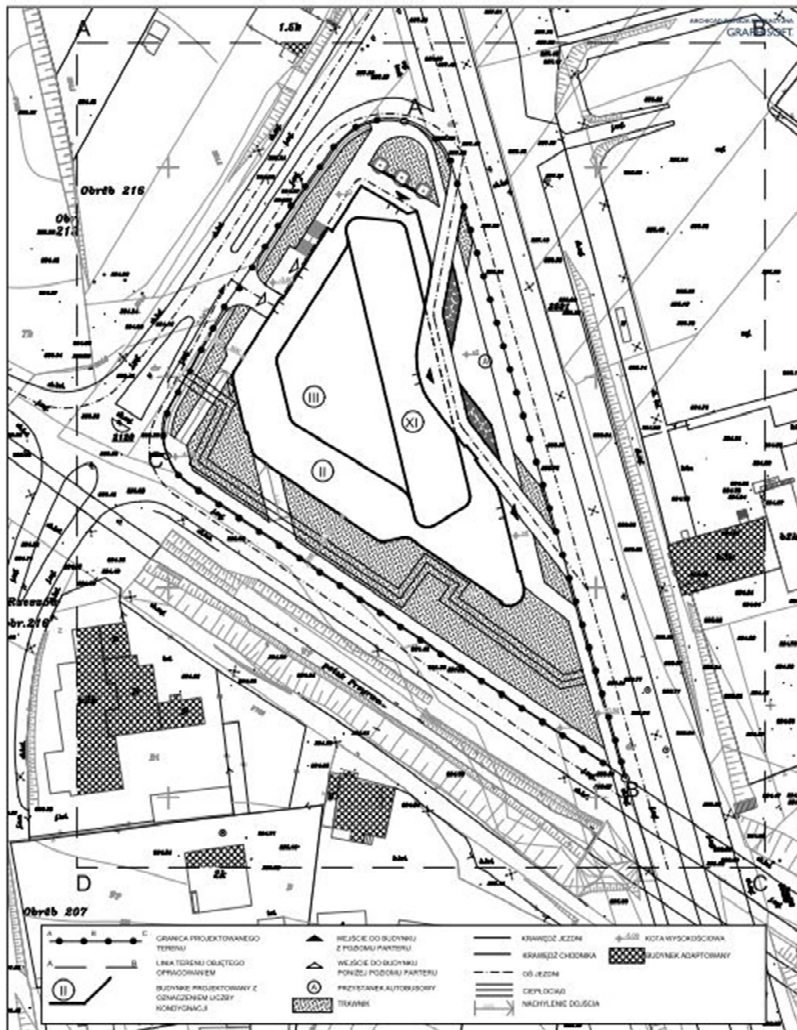
Problematyka projektowania budynków wysokich została przedstawiona poniżej na przykładach dwóch projektów budynków użyteczności publicznej:

- wysokiego budynku hotelowego (2) – praca dyplomowa autorstwa mgr inż. arch. Klaudii Jaremy-Kuśnierz. Promotor pracy dr hab. inż. arch. Adam Rybka, prof. PRz.
- wysokiego budynku biurowego (3) – praca dyplomowa autorstwa mgr inż. arch. Marty Jańczuk. Promotor pracy dr hab. inż. arch. Adam Rybka, prof. PRz.

2. Wysoki budynek hotelowy

2.1. Lokalizacja

Projektowany budynek zlokalizowany jest w Rzeszowie, w jego północnej części na działkach numer 55, 57/1, 57/2, 558/1, 58/2, 58/359, 61,62/3, 63/1, 68/45. Działki znajdują się pomiędzy trzema ulicami: Warszawską, Aleją Wyzwolenia, Kornela Ujejskiego (rys. 1).



Rys. 1. Projekt zagospodarowania terenu. Fragment pracy dyplomowej Klaudii Jaremy-Kuśnierz – Projekt architektoniczny wysokiego budynku hotelowego

Fig. 1. Land development plan. Fragment of Klaudia Jarema-Kusnierz diploma thesis – Architectural project of a high hotel building

Podczas wyboru lokalizacji architekt kierował się potrzebami osób przyjeżdżających do miasta. Najwięcej ludzi podróżuje samochodami lub samolotami. Proponowana lokalizacja obiektu jest bardzo sprzyjająca dla funkcjonowania hotelu. Projektowany budynek znajduje się przy trasie łączącej miasto z autostradą A4. Ulica Warszawska to droga biegnąca do Portu Lotniczego Jasionka. Dzięki tej lokalizacji obiektu hotelowego osoby zaraz po zjechaniu z A4 lub wylądowaniu na lotnisku, mogą znaleźć miejsce do odpoczynku. Hotel znajduje się na obrzeżach miasta, ale w nie dużej odległości od centrum, co jest również udogodnieniem dla przybyłych osób oraz atutem wybranej lokalizacji.

2.2. Kształtowanie bryły

Najbardziej interesujące są projekty architektoniczne, w których projektant subtelnie i delikatnie ingeruje w formę architektoniczną przez co unika błędów w jej kształtowaniu. Jak ogólnie wiadomo, nie można zaprojektować budynku, którego forma, wygląd zewnętrzny zostanie pozytywnie oceniony przez wszystkich obserwatorów, ponieważ odbiór obrazu, rzeźby, sztuki czy ogólnie formy jest zawsze subiektywny. Ważniejsze od zastosowanego warsztatu architektonicznego - podstawowego narzędzia architektury, jest zrozumienie kontekstu przestrzennego danego obiektu. Szczerość formy, odporność na zmieniające się gusty i trendy, prestiż, wpływ na emocje obserwatora to główne czynniki wpływające na percepcję obiektu architektonicznego. Percepcja determinuje odbiór architektury tak mocno jak jej początek czyli wstępna idea-design. Dużym wyznacznikiem projektowania bryły omawianego obiektu była jego lokalizacja oraz teren. Jednym z problemów tworzenia obiektu był trójkątny kształt działki. Narzucał on obrys budynku. Niewielka powierzchnia działki ograniczała poziome gabaryty budynku.

Budynek został zróżnicowany pod względem wysokości, posiada główny 11 kondygnacyjny środkowy fragment oraz stopniowanie ilości kondygnacji, niższych bocznych części.

Niższe, rozłożyste części budynku spełniają funkcje usługowo-rekreacyjną. Pomimo trójkątnego planu budynek posiada on prostokątny ryzalit główny, w którym dłuższy bok jest równoległy do ul. Warszawskiej podkreślając jej miejski charakter. Dwie dłuższe ściany są orientowane w kierunkach wschód-zachód, co jest korzystne przy projektowaniu hotelowych jednostek mieszkaniowych. Podsumowując głównymi wyznacznikami w tworzeniu bryły budynku był kształt działki, sąsiednie drogi, orientacja względem stron świata oraz funkcja podstawowa (rys. 2).



Rys. 2. Wizualizacja. Fragment pracy dyplomowej Klaudii Jaremy-Kuśnierz – Projekt architektoniczny wysokiego budynku hotelowego

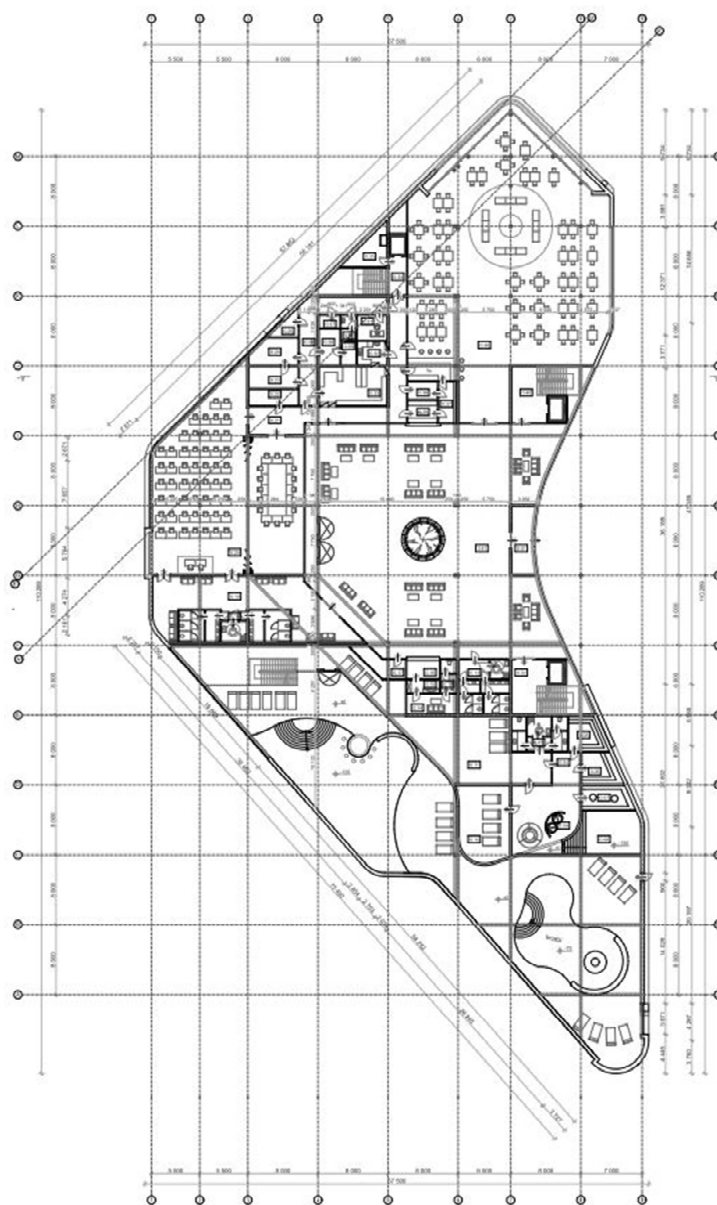
Fig. 2. Visualisation. Fragment of Klaudia Jarema-Kusnierz diploma thesis – Architectural project of a high hotel building

2.3. Funkcja budynku

Tu pojawia się pytanie dotyczące relacji między formą i funkcją. W tradycyjnym modernistycznym rozumieniu mamy następującą relację: funkcja budynku jest programowym rozwinięciem celu jakiego ma służyć obiekt. Funkcja jest istotnym czynnikiem wpływającym na kształt i wygląd budynku.

Możliwe jest jednak inne spojrzenie, które zwraca uwagę na to, że funkcja jest do pewnego stopnia nieukształtowaną formą. Formą, która jest przed i ponad funkcją, a na samym początku projektowania znajduje się idea-design. Konkretnie, szczegółowe pełne detali myślenie na poziomie design zbytnio materializuje projekt prowadząc go do pewnej formy lub funkcji. Forma i funkcja powinny być wynikiem modelowania nieskrępowanej idei, a nie wynikiem wynikającym z wcześniej przyjętych założeń bo wtedy nie będzie spójna z pozostałymi czynnikami kształtującymi architekturę.

W projektowanym obiekcie na pierwszej i drugiej kondygnacji nadziemnej o najbardziej rozbudowanym kształcie znajduje się funkcja usługowo-rekreacyjna. W jej skład wchodzi pomieszczenia przeznaczone na restaurację i zaplecze konferencyjne oraz Wellnes&Spa z dwoma basenami i gabinetami odnowy biologicznej, typu fitness (rys. 3, 4).



Rys. 3. Rzut kondygnacji I. Fragment pracy dyplomowej Klaudii Jaremy-Kuśnierz – Projekt architektoniczny wysokiego budynku hotelowego

Fig. 3. First floor view. Fragment of Klaudia Jarema-Kusnierz diploma thesis – Architectural project of a high hotel building

Kondygnacja trzecia o mniejszym obrysie przeznaczona jest pod jednostki mieszkaniowe o podwyższonym standardzie użytkowania. Znajdują się tu apartamenty z pokojami kąpielowymi.

Kondygnacje kształtujące najwyższą część budynku posiadają powtarzalną funkcję. Na nich zaprojektowano jednostki mieszkaniowe o podstawowym standardzie. Niektóre z nich posiadają dostęp do ogrodów zimowych, które odgrywają rolę w kształtowaniu elewacji. Budynek dysponuje łącznie 283 pokojami hotelowymi.

2.4. Konstrukcja

Budynek hotelowy zaprojektowano jako szkieletowy-żelbetowy. Obiekt składa się z wielokondygnacyjnego układu słupów, rozmieszczonych na siatce wprowadzającej podział rzutu na 8 traktów poprzecznych oraz 12 podłużnych. Słupy zaprojektowano jako żelbetowe o przekroju 30 x 30 cm. Na nich oparte są stropy za pośrednictwem poziomego rusztu złożonego z podciągów. Usztywnienie budynku wykonywane jest ze stężeń umieszczanych w płaszczyźnie ścian zewnętrznych, sztywnych stropów i rdzenia (trzonu) budynku. Wewnątrz tej konstrukcji umieszczone są żelbetowe klatki schodowe (zaproponowano jako dwubiegowe) oraz szyby windowe.

W budynku zaprojektowano żelbetowe ławy fundamentowe stanowiące oparcie dla słupów i ścian nośnych. Wysokość ławy – 40 cm, szerokość – 70 cm.

Ściany zewnętrzne stanowią wypełnienie szkieletu całej konstrukcji. Wykonane z pustaków ceramicznych na zaprawie cementowo-wapiennej. Ich grubość wynosi 29 cm. Dodatkowo na ścianach zewnętrznych zaprojektowano ocieplenie w postaci wełny mineralnej grubości 15 cm.

Zaprojektowano przerwy dylatacyjne, które dzielą budynek na cztery części. Wydzielają one wszystkie elementy konstrukcyjne w jednym przekroju od fundamentów po dach. Części te samodzielnie przenoszą przewidywane obciążenia, odkształcenia i przesunięcia.

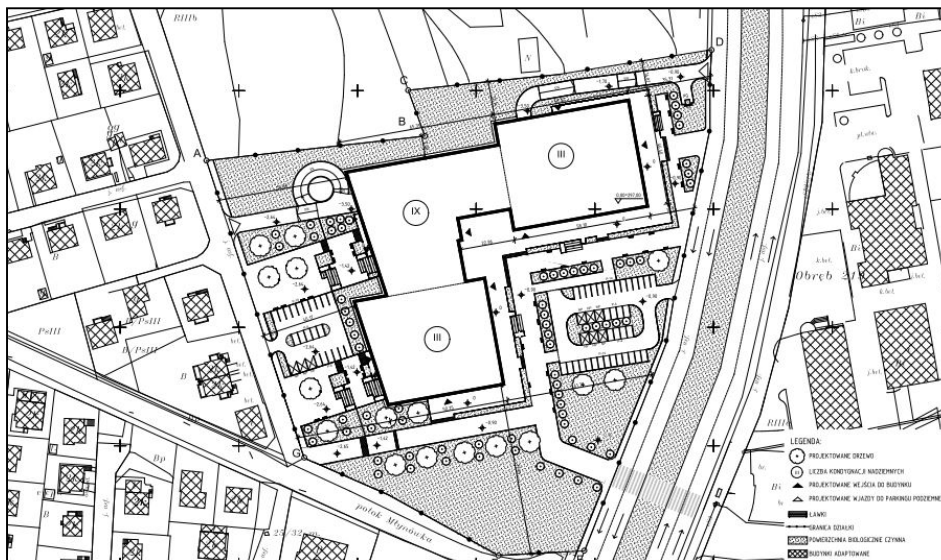
W budynku zaprojektowano dach jako stropodach pełny na stropie żelbetonowym, jego nachylenie wynosi 3%. Składa się on z żelbetowej płyty stropowej grubości 15 cm, warstwy spadkowej z betonu, folii paroizolacyjnej, wełny mineralnej w układzie dwuwarstwowym oraz pokrycia dachowego z dwóch warstw papy termozgrzewalnej.

Wysokość kondygnacji parteru oraz pierwszego piętra wynosi 4,0 m, podziemnej 3,1 m, natomiast pozostałych przeznaczonych pod jednostki mieszkaniowe 3,3 m. Maksymalna wysokość budynku wynosi 38,40 m.

3. Wysoki budynek biurowy

3.1. Lokalizacja

Teren na, którym został zaprojektowany budynek biurowy składa się z czterech działek o numerach 662, 661/4, 1812/1, 1812/3 (rys. 5). Powierzchnia terenu wynosi 300,0574 ar (ok. 3,0 hektary). Działki sąsiadują od strony wschodniej



Rys. 5. Projekt zagospodarowania terenu. Fragment pracy dyplomowej Marty Jańczuk – Projekt architektoniczny wysokiego budynku biurowego

Fig. 5. Land development plan. Fragment of Marta Jańczuk diploma thesis – Architectonic project of the high office building

z drogą krajową (ul. Armii Krajowej), od zachodniej z ul. Lotników, a od strony południowej graniczy z potokiem Młynówka. Sąsiedztwo ulic i dróg w obrębie działek stwarza dobre warunki komunikacyjne dotyczące połączeń. Projektowany biurowiec usytuowany jest w sąsiedztwie dużych znaczących obiektów handlowo-usługowych takich jak: Skarbiec Narodowego Banku Polskiego, sklep Makro. Budynek rozmyślnie zaprojektowany został na linii widokowej prowadzącej od Zamku Lubomirskich (obecnie siedziba Sądu Okręgowego) przez Capital Tower, Millenium Hall, Capital Park. Funkcja biurowa jest uzasadniona ze względu na brak takich rozwiązań w śródmiejskiej części Rzeszowa. Jako budynek o nowoczesnej technologii stworzy komfortowe warunki pracy i przyczyni się do wzrostu liczby miejsc pracy w mieście, co jest bardzo ważne w tym regionie. Dodatkowym atutem jest napływ przyszłych klientów, interesantów i inwestorów. Nowoczesne budynki biurowe poprawiają krajobraz i wizerunek miasta. Budynek został zaprojektowany na linii widokowej, która wyznaczona jest przez ważne obiekty dla miasta Rzeszowa. Są nimi: Zamek Lubomirskich (obecnie siedziba Sądu Okręgowego), Capital Towers, Millenium Hall, Wyższa Szkoła Prawa i Administracji przy cegielnianej 14, Biblioteka Uniwersytetu Rzeszowskiego, Centrum Dydaktyczno-Naukowe Mikroelektroniki i Nanotechnologii jak również Capital Park. Patrząc w kierunku północnym możemy zauważyć w oddali Sąd Rejonowy na Kustronia 4, a w dalszym zasięgu Galeria Rzeszów z Hotelem Rzeszów. Dzięki temu obiekt wpasowuje się w krajobraz

urbanistyczny, jest zaznaczony w zauważalny sposób dla miasta, nie dominuje nad miastem, natomiast wyznacza określony kierunek. Zaprojektowany w tym miejscu jest punktem zwrotnym, pomocnym przy orientacji przestrzennej w Rzeszowie (rys. 6).



Rys. 6. Lokalizacji budynku biurowego – schemat ilustrujący zasięg widoku

Fig. 6. Office building location – a diagram showing the view range

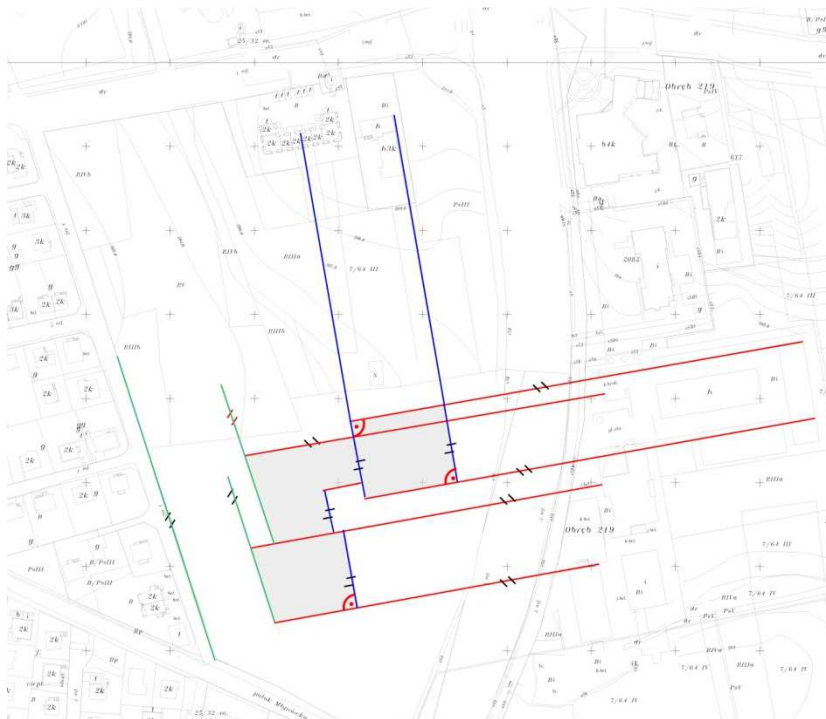
Zaprojektowany budynek ma zróżnicowane wysokości. W dwóch częściach jest trzykondygnacyjny, a jego centralny trzon posiada IX kondygnacji nadziemnych. Główne wejścia znajdują się od strony: południowo-wschodniej, wschodniej i południowej. Natomiast wjazdy na parking podziemny przewidziano od strony zachodniej i wschodniej. Oprócz wejść głównych do budynku zaprojektowano jeszcze pięć innych wejść. Ze względu na ukształtowanie terenu działki, zaprojektowano schody terenowe oraz pochylnie spełniające wymogi dla osób niepełnosprawnych.

Na działce zaprojektowano place rekreacyjno-wypoczynkowe z ławeczkami i zagospodarowaną zielenią. Od strony ul. Armii Krajowej i Lotników zaprojektowano parkingi naziemne wraz z miejscami postojowymi dla osób niepełnosprawnych.

3.2. Kształtowanie bryły

Podczas kształtowania bryły brano pod uwagę kierunki istniejącej zabudowy, których efektem jest kształt projektowanego budynku wysokiego. Czerwone linie ukazują kierunki istniejącej zabudowy po stronie wschodniej, do której nawiązano w projektowanym obiekcie. Od strony zachodniej linia zabudowy

projektowanego obiektu nawiązuje do drogi. Z kolei niebieskie linie odnoszą się do kierunku oraz zabudowy po stronie północnej działki (rys. 7).

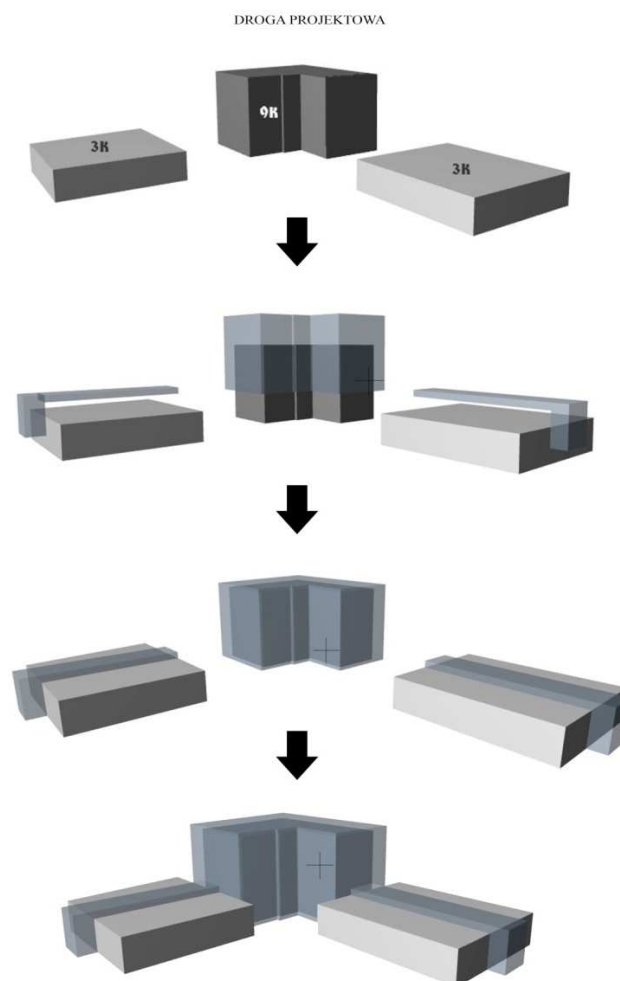


Rys. 7. Kierunki projektowe. Fragment pracy dyplomowej Marty Jańczuk – Projekt architektoniczny wysokiego budynku biurowego

Fig. 7. Design directions. Fragment of Marta Jańczuk diploma thesis – Architectonic project of the high office building

W pierwszej fazie powstała koncepcja zmierzająca do dopasowania obiektu pod względem wysokościowym do otaczającej przestrzeni urbanistycznej, w której dominują budynki w zabudowie niższej (budynki 3-4 kondygnacyjne i jednorodzinne). W sąsiedztwie działki, na której zaprojektowano biurowiec wznosi się wysoki 13 kondygnacyjny budynek. Architekt mając na uwadze wszystkie aspekty uwarunkowania przestrzennego, zaprojektował 9 kondygnacyjny, główny trzon budynku oraz dwie części niższe 3 kondygnacyjne. Ta idea doprowadziła do zaprojektowania budynku o zróżnicowanej wysokości. Bryła budynku urozmaicona została zastosowanym materiałem. W głównej najwyższej części 9 kondygnacyjnej zastosowano duże powierzchnie przeszklone. Przeszklono również pasaż znajdujące się w niższej części obiektu, które dodatkowo łączą bryłę w jedną całość. W dwóch częściach niższych zastosowano pio-

nowy podział okien nawiązujący do podziału powierzchni szklanych najwyższej części budynku (rys. 8).



Rys. 8. Fazy powstania bryły. Fragment pracy dyplomowej Marty Jańczuk – Projekt architektoniczny wysokiego budynku biurowego

Fig. 8. Phase of the formation building block. Fragment of Marta Jańczuk diploma thesis – Architectonic project of the high office building

Podsumowując głównymi czynnikami biorącymi udział w kształtowaniu bryły były linie zabudowy sąsiedniej, jej wysokości, funkcja oraz usytuowanie obiektu względem drogi (rys. 9, 10).



Rys. 9. Wizualizacja. Fragment pracy dyplomowej Marty Jańczuk – Projekt architektoniczny wysokiego budynku biurowego

Fig. 9. Visualisation. Fragment of Marta Jańczuk diploma thesis – Architectonic project of the high office building



Rys. 10. Wizualizacja. Fragment pracy dyplomowej Marty Jańczuk – Projekt architektoniczny wysokiego budynku biurowego

Fig. 10. Visualisation. Fragment of Marta Jańczuk diploma thesis – Architectonic project of the high office building

3.3. Funkcja budynku

Zaprojektowany budynek jest obiektem wysokim wielokondygnacyjnym wraz z dwoma podziemnymi kondygnacjami parkingowymi i jest przystosowany dla osób niepełnosprawnych. Oprócz głównej funkcji biurowej budynek posiada funkcje: usługową, kulturalno-rozrywkową i naukowo-dydaktyczną. W dwóch kondygnacjach podziemnych znajduje się zaplecze techniczne, w skład którego wchodzi: przyłącz wody, węzeł C.O., rozdzielnia elektryczna, serwerownia, wentylatornia, magazyny oraz powierzchnia parkingowa dla 316 miejsc postojowych, w tym również przeznaczonych dla osób niepełnosprawnych. Bryła budynku składa się z trzech części, które oddzielone są od siebie przerwami dylatacyjnymi.

Dwie niższe części budynku zawierają trzy kondygnacje nadziemne, w których główny hall oraz foyer został dobrze doświetlone poprzez zaprojektowane świetliki dachowe. Kondygnacje skomunikowane są przez zaprojektowane schody ruchome.

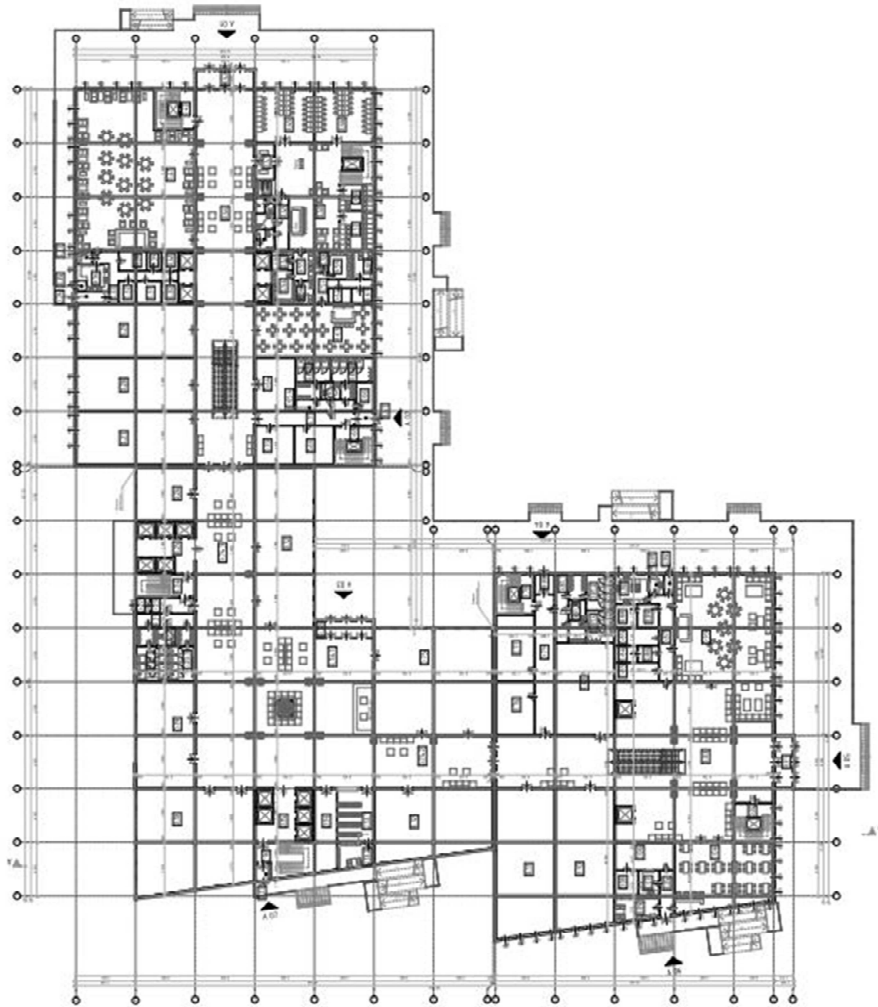
Część budynku od strony północno-wschodniej składająca się z trzech kondygnacji nadziemnych w parterze mieści restaurację, dwupiętrowe kasyno, kawiarnię, lokale usługowe pod wynajem, pomieszczenia porządkowe i techniczne oraz sanitariaty. Na I piętrze zaprojektowano lokale usługowe do wynajęcia. III kondygnacja jako część kulturalno-rozrywkowa, gdzie znajdują się szkoła tańca i klub fitness.

Trzecia część od strony południowej również składa się z trzech kondygnacji nadziemnych. W tej części na parterze zaprojektowano restaurację, kawiarnię oraz ekskluzywne lokale usługowe. Na powyższych dwóch kondygnacjach mieszczą się duże sale wykładowe w tym jedna o układzie kinowym, sale konferencyjne o zróżnicowaniu powierzchniowym i układowym.

Trzy pierwsze kondygnacje nadziemne tworzą niższą część obiektu, natomiast wyższe kondygnacje są powtarzalne, tworzą one główny trzon. Centralna część budynku – biurowa, zawiera dziewięć kondygnacji nadziemnych. Łączna powierzchnia biurowa wynosi 9442,72 m². Biura występujące w obiekcie mają charakter mieszany ponieważ stosuje się wielko powierzchniowe pomieszczenia biurowe typu „open space”, a także indywidualne mniejsze pomieszczenia biurowe na 4-6 stanowisk. W tej części tj. od strony południowo-wschodniej znajduje się główne wejście do budynku z reprezentacyjnym hallem recepcyjnym, który prowadzi do foyer ekspozycji tymczasowej i galerii sztuki. Na każdej kondygnacji w trzonie głównym oprócz biur zaprojektowano barki kawowe oraz sanitariaty. Część biurowa łączy się komunikacyjne z dwoma pozostałymi częściami budynku. Na ostatniej IX kondygnacji tej części budynku zaprojektowany został taras zielony widokowy, który umożliwia wyjście z biur.

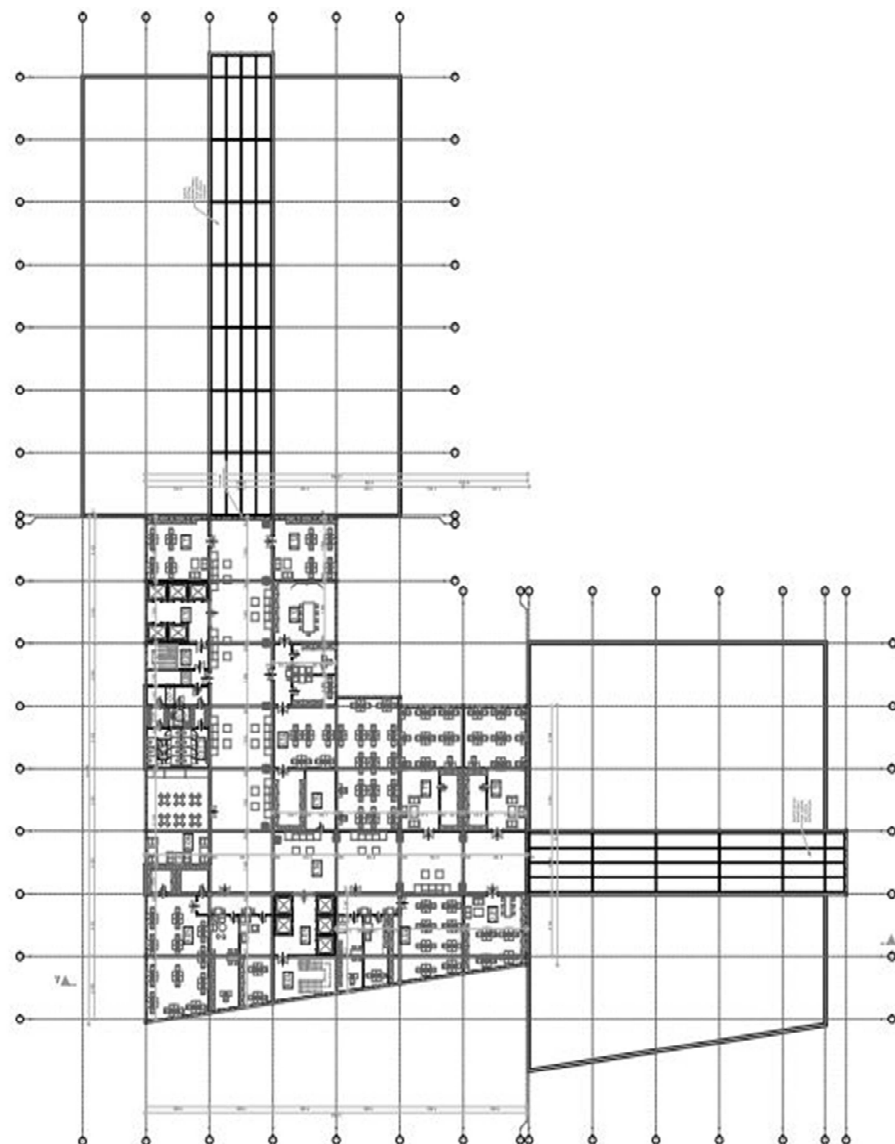
Taki układ bryły budynku uwidacznia zróżnicowanie obiektu i generuje podział funkcji. Komunikację pionową budynku stanowią schody i windy. W budynku zaprojektowano sześć klatek schodowych ewakuacyjnych, z czego dwie

mieszczą się w głównym trzonie i komunikują dziewięć kondygnacji nadziemnych i dwie kondygnacje podziemne. Do każdej części budynku znajdują się osobne wejścia, jest ich w sumie osiem (rys. 11, 12).



Rys. 11. Rzut kondygnacji I. Fragment pracy dyplomowej Marty Jańczuk – Projekt architektoniczny wysokiego budynku biurowego

Fig. 11. First floor view. Fragment of Marta Jańczuk diploma thesis – Architectonic project of the high office building



Rys. 12. Rzut III-VIII kondygnacji. Fragment pracy dyplomowej Marty Jańczuk – Projekt architektoniczny wysokiego budynku biurowego

Fig. 12. Floor plan view (third to eleven). Fragment of Marta Jańczuk diploma thesis – Architectonic project of the high office building

3.4. Konstrukcja

Budynek biurowy został zaprojektowany w konstrukcji szkieletowej żelbetowej, oparty jest na 12 traktach poprzecznych i 15 podłużnych. Główny element

konstrukcji stanowią słupy o przekroju kwadratowym 30 x 30 cm, posadowione na stopach i ławach fundamentowych. Ich rozstaw osiowy oparty jest na siatce o wymiarach 9,00 m na 8,10 m. Do zbrojenia konstrukcji zastosowano stal klasy A-IIIIN w związku z występującymi obciążeniami.

Elementem nośnym ścian są poprzeczne i podłużne podciągi oraz belki konstrukcyjne, o wysokości przekroju 35 cm do 50 cm, na których oparte są stropy gęstożebrowe o rozpiętości 9,00 m na 8,10 m. Maksymalna wysokość kondygnacji w parterze 4,20 m. Część wysoka administracyjno-biurowa również o konstrukcji żelbetowej w układzie powtarzalnym o wysokości kondygnacji 3,20 m.

Część wysoka budynku posiada konstrukcję zewnętrzną, osłonową stanowią elementy elewacji systemowych. W części niskiej do 3 kondygnacji ściany zewnętrzne osłonowe wykonane z pustaków Porotherm 38 T DRYFIX. Elewacje niższych części zaprojektowane z eleganckich matowych płyt włókowo-cementowych, które cechują się możliwością barwienia w odcieniach szarości. Płyty montowane do elewacji na specjalnych kotwach.

Komunikacja pomiędzy kondygnacjami oparta o schody żelbetowe monolityczne, wylewanych na miejscu budowy. Komunikację pionową stanowią zamknięte klatki schodowe, spełniające warunki przeciwpożarowe, oraz halle windowe z dźwigami pionowymi (trzony budynku).

Przerwa dylatacyjna zaprojektowana została w dwóch miejscach. Dylatacje wprowadzono w miejscach gdzie wysokość budynku jest zróżnicowana.

Ostatnią kondygnacja budynku stanowi dach płaski o spadkach 3%. Zaprojektowany dach to stropodach pełny o odwróconym układzie warstw. Maksymalna wysokość budynku wynosi 37,90 m.

4. Podsumowanie

Powstawanie zabudowy wysokiej w tkance miejskiej rozwijających się miast takich jak Rzeszów jest zjawiskiem naturalnym. Jest to istotny oraz pozytywny element rozwoju przestrzennego, jednakże należy pamiętać o zabudowie istniejącej. Miejskie śródmieścia zazwyczaj są ważne pod względem historycznym oraz kulturowym, więc powinno się „podchodzić” do projektowania w ich obrębie z poszanowaniem zastanej zabudowy. Kształtowanie wysokich obiektów architektury w zabudowie miejskiej nie może spełniać samej potrzeby stworzenia wysokiego budynku, lecz czynić to w sposób wiarygodny, wpisujący obiekt w charakter danego miejsca w mieście. Architektura zrównoważona, przemyślana wpisuje się w genius loci danego miejsca, staje się elementem gry w miasto, doświadczeniem różnych kreacji przestrzeni. Zdecydowana, zintegrowana z otoczeniem architektura charakteryzować się będzie warstwą znaczeniową o cechach siłą rzeczy monumentalnych. Naturę obu przedstawionych budynków stanowią formy architektury mające odmienną wymowę graficzną i plastyczną, ale oba obiekty wnikają z przestrzeni danego obszaru miasta i wykorzystują jej chwilową dyspozycję przestrzenną.

Powstanie dobrej architektury, to odpowiedź na poprawnie postawione pytania funkcjonalne, systemowe i percepcyjne. Formułowanie tych specyficznych pytań jest zróżnicowane i uzależnione od sytuacji lokalnej, musi uwzględniać wieloaspektowość: kulturową, społeczną, geograficzną, krajobrazową, ekonomiczną.

Żyjemy w społeczeństwie z wykształconym nawykiem mobilności w przestrzeni opartej o orientację w przestrzeni z wykorzystaniem akcentów wysokościowych w przestrzeni. Jesteśmy globalnymi odkrywcami, poszukujemy, penetrujemy nowe obszary, odnajdujemy siebie w skrajnie odległych miejscach. Architektura podąża tropem nas samych. Będzie odkrywać nowe możliwości kształtowania przestrzeni miejskiej. To podstawowa cech współczesnego innowacyjnego design miejskiego.

Literatura

- [1] Pawłowski Z., Cała I.: Budynki wysokie, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [2] Skidmore, Owings & Merrill: Architektura i architekci świata współczesnego, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1989.
- [3] Wejchert K.: Elementy kompozycji urbanistycznej, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2008.
- [4] Oficjalna strona internetowa Urzędu miasta Rzeszowa, www.rzeszow.pl/turystyka/wizytowka-miasta (dostęp 15.03.2015).

DEVELOPMENT OF HIGH OBJECTS OF ARCHITECTURE IN THE RZESZOW URBAN SPACE

Summary

The issue of Formation of high architecture in the urban area is present in architecture, Urban planning and social science since start of XX century until contemporary. References to the idea are seen today in practice and theory of architecture in projects of the buildings and in publications. The article introduces the subject describing the idea of Formation of high architecture in the urban area - Its roots and cultural background. Two example of project of high rise buildings in Rzeszow were described. Attempt to answer the question of whether the development of high architecture in the urban area of Rzeszow is justified spatially. The appearance of the development of high architecture in the urban area of Rzeszow in two guises - as a response to the needs of the city. Moving the stability problem of structural and technological Shaping the shape of the object based on the selected design solutions, optimization of the solid solutions applied. Architecture depends on the place where the counterbalances the instability of repetitive solutions presented in two different locations of the urban environment Rzeszow.

Keywords: architecture of offices and hotels, forming lumps, durability, urban environment, Rzeszow

Przesłano do redakcji: 2.10.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Marta RUSNAK¹

WPLYW ASPEKTÓW FUNKCJONALNYCH, EKONOMICZNYCH I PSYCHOLOGICZNYCH NA OKNO MUZEALNE W ZABYTKOWYM BUDYNKU POPRZEMYSŁOWYM

Projektowanie, budowa i organizacja muzeum w zabytkowych budynkach poprzemysłowych to proces wielowarstwowy i skomplikowany. Wymaga też szerokiego kompromisu pomiędzy pragnieniem zachowania historycznej przestrzeni w możliwie niezmienionej formie a chęcią zapewnienia optymalnych warunków samej ekspozycji i ją oglądającym. Jeden z takich dylematów dotyczy problematyki związanej z oknami. Oprócz czynników prawnych równie ważne są aspekty użyteczności, ekonomii i zagadnienia psychologii percepcji ekspozycji, i dlatego to na nich skupi się ten artykuł. Przedstawione zostaną w nim najważniejsze zagadnienia usprawniające zarówno proces budowlany, jak i późniejsze wieloaspektowe funkcjonowanie muzeum. Zagadnienie to zostanie omówione na przykładzie wybranych polskich muzeów, które w latach 2004-2015 powstały w budynkach poprzemysłowych.

Słowa kluczowe: okno, zabytek przemysłu, adaptacja, muzeum, estetyka, ekonomia, percepcja ekspozycji

1. Wstęp

Przystosowanie zabytku techniki dla potrzeb muzealnych to skomplikowany i wielowarstwowy problem. Adaptacja takiego obiektu jest zwykle omawiana jako zjawisko dotyczące całości budynku; omawia się przeważnie jej kontekst społeczny, urbanistyczny, historyczny lub skupia się na konkretnej grupie zabytków, np. wieżach ciśnień czy też na ich docelowej funkcji. W niniejszym artykule zastosowano jednak podejście odmienne, a celem tego studium jest naświetlenie konkretnego problemu projektowego, jakim jest zagadnienie okna muzealnego w obiekcie poprzemysłowym. Tekst ten zredagowano w oparciu o polskie przykłady adaptacji, w których interwencje budowlane zostały podjęte w latach 2004-2015. Opis nie odnosi się do zagadnień prawnych, ta tematyka została zarysowana w osobnym artykule zatytułowanym „Gdy okno zabytku przemysłu

¹ Marta Rusnak Katedra Historii Architektury Sztuki i Techniki, Politechnika Wrocławska, marta.rusnak@pwr.edu.pl

staje się oknem muzealnym. Streszczenie sytuacji prawnej”. Przedstawione poniżej opracowanie dotyczy zagadnień związanych z ekonomią, funkcjonalnością i psychologią percepcji. Wymienione elementy mogą mieć zasadniczy wpływ na działania podejmowane w odniesieniu do zabytkowych przegród budowlanych.

2. Użyteczność i funkcjonalność

2.1. Elastyczność przestrzeni ekspozycyjnej

Niezbędnym do omówienia, choć z pozoru może banalnym zagadnieniem, jest konieczność znalezienia w muzeum płaszczyzny dla powieszenia obrazu lub wydzielenia kubatury dla określonej wielkości rzeźby. Okna w budynkach przemysłowych, ich liczba, dyspozycja i powierzchnia mogą po tym względem znacząco ograniczać ekspozycyjną funkcjonalność wnętrza. Choć jest to problem dotyczący różnych grup rewitalizowanych zabytków, w przypadku fabryk jest to szczególnie duże wyzwanie projektowe. W części z nich tak jak np. w Galerii Sztuki będącej oddziałem Muzeum im. Leona Wyczółkowskiego w Bydgoszczy spora część okien została zastąpiona ekranami i roletami. W podobny sposób zamontowane na równi z wewnętrznym licem ściany rolety wykorzystuje się dla potrzeb częstych zmian aranżacji w budynku D w Centralnym Muzeum Włókiennictwa. W tym muzeum zastąpieniu nie podlegają wszystkie okna, dzięki czemu z zewnątrz nie powstaje wrażenia nieużytkowanego lub niedostępnego wnętrza. Takie przykre wrażenie można natomiast odnieść, zbliżając się do oddziału Muzeum Historii Miasta Krakowa mieszczącego się w tzw. Fabryce Schindlera.

Innym rozwiązaniem jest zamurowanie części okien, do czego doszło w MS2 w Łodzi. Na elewacji północnej w pełni zaślepiono 18 z 21 pierwotnych osi okiennych, także kilka innych okien, uzyskując od wewnątrz długą niepodzieloną elementami architektonicznymi ścianę, co z pewnością ułatwia aranżacje wystaw. Od zewnątrz zaślepione fragmenty przykryto pojedynczym przeszkleniem opartym podziałami kopiującymi te pierwotne. Ze względu na sąsiedztwo dużej galerii handlowej na tę elewację patrzy się zazwyczaj pod dużym kontem, dlatego uzyskano zaplanowaną iluzję. Z niektórych miejsc rozwiązanie wygoda jednak mało atrakcyjnie. Taka decyzja może budzić kontrowersje, choć obok wspomnianego już wcześniej wpływu na przestrzeń ekspozycyjną jest podyktowana także chęcią zasłonięcia estetycznie wątpliwego widoku: okna wychodziłyby na dach centrum handlowego pełen urządzeń technicznych. Ponadto bardzo istotnym – jeśli nie najistotniejszym – argumentem była w tym przypadku potrzeba jak najpełniejszego, ekonomicznego wykorzystania przestrzeni sąsiadującego z muzeum centrum handlowego. W tym celu należało uzyskać ścianę o wysokiej izolacyjności pożarowej, a zamurowanie okien okazało się w tym przypadku najtańszym rozwiązaniem. Szkoda, że przy tak wielkich zmianach, konserwator nie wymógł na inwestorze użycia oryginalnych elementów demontowanych z tej lub przeciwległej elewacji, zamiast wykonywania nowego sztafażu architektonicznego. Argumentami przemawiającymi za ponownym wykorzystaniem starych ram okien-

nych powinny być ekologia oraz niższy koszt inwestycji. Gmach łódzkiego muzeum jest jednym z najbardziej swobodnie modyfikowanych zabytków. Do zamurowania kolejnych otworów przyczyniła się chęć umieszczenia przy nich szaf transformatorowych, a także wykorzystanie kilku okien w charakterze gablot reklamowych. Ten przykład pokazuje jak różne aspekty funkcjonowania muzeum stają się powodem wieloaspektowej utraty autentyczności elewacji [8].

Odmianą taktykę, choć nie oderwaną od aspektów funkcjonalnych, obrano w Muzeum Wisły w Tczewie i przylegającej do niej Fabryce Sztuki, której budynek przypomina pierwotny układ tkalni zaadaptowanej na MS2. W Tczewie postarano się powstrzymać przed trwałymi interwencjami, a także zrównoważyć modyfikacje z zabiegami konserwatorskimi. W fabryce nie zamurowano żadnego okna, zachowując od zewnątrz stalowe ramy zabytkowego układu. Nowe okna, dodane od wewnętrznej strony, wyposażono w dwudzielne rolety. Głębokie nisze okienne są wykorzystywane jako otwierane lub zamykane na światło dzienne gabloty ekspozycyjne. Nie można tam jednak umieścić kolekcji o dowolnych rozmiarach, co z pewnością chciano osiągnąć w muzeum łódzkim.

Innym sposobem zwiększenia funkcjonalnej elastyczności zabytkowego wnętrza, poprzez uniezależnienie się rytmu podziałów okiennych, jest zastosowanie logiki „box in box”, wedle której zabytkowy budynek staje się płaszczyzną okalającą wewnętrzną strukturę. Tak transformowany obiekt musi posiadać na tyle duże rozmiary, aby uzyskana przestrzeń wewnętrznego pudła była w dalszym ciągu atrakcyjna. W polskich muzeach nie spotkamy takiego rozwiązania projektowego służącego zachowaniu autentyczności zabytkowych okien, natomiast przykładem tej logiki są wysokie parawany otaczające sale ekspozycyjne Fundacji Art Stations Foundation na terenie Starego Browaru w Poznaniu, czy przystawione bezpośrednio do okien zabudowy gipsowo-kartonowe w Mazowieckim Centrum „Elektrownia” w Radomiu. Rozwiązania te nie były jednak w żaden sposób powiązane z chęcią zachowania oryginalnych przeszkleń.

Omawiany efekt kompromisu pomiędzy funkcjonalnością a konserwatorską perfekcją wyrażający się w logice „box in box” najpełniej widać na zagranicznym w tym wypadku przykładzie Muzeum Sztuki Współczesnej w Cottbus. Wiąże się to z uniezależnieniem wymagań dotyczących zabytku nieruchomego i wymagań sformowanych tak, aby zabezpieczyć kolekcję.²

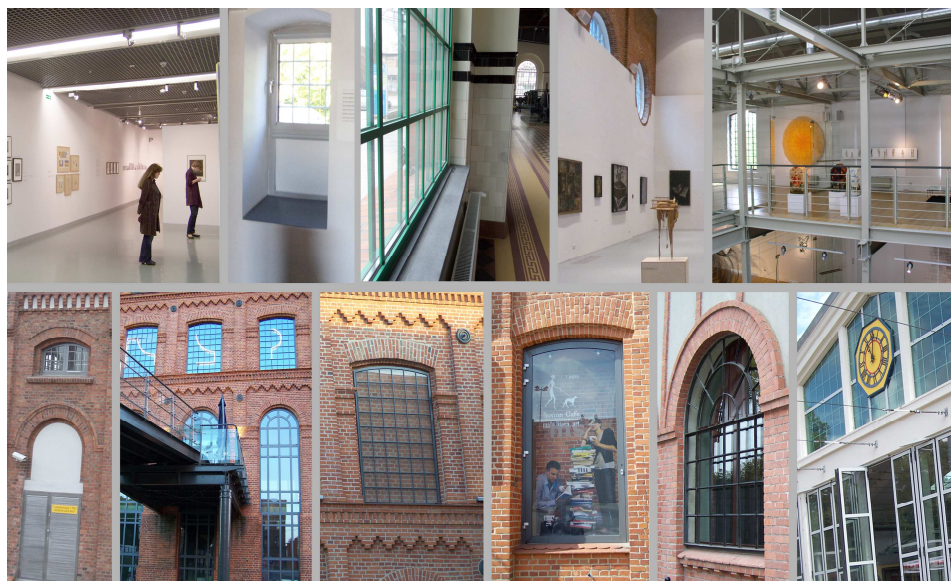
2.2. Okno a percepcja wystawy

Wielokrotnie chęć odsunięcia eksponatu od okna lub stworzenia wystawy pozbawionej możliwości wyglądnięcia na zewnątrz obiektu podyktowana jest chęcią wyeliminowania z ekspozycji elementów, które wizualnie mogłyby odwracać uwagę widza od kolekcji. „Zależność ta dotyczy szczególnie obrazu, który swą ramą odcina się od rzeczywistości, wykrawa z niej niejako okno, pozwalające zajrzeć do innego świata” [1]. Skoro kurator chce budować w widzu pewne po-

² Chodzi także o ograniczanie promieniowania UV, kontrolę wilgotności, temperatury oraz jakości powietrza.

znawcze napięcie, może dążyć do tego aby inne perspektywy poznawcze nie przeszkadzały w percepcji wystawy. Dotyczy to zarówno tych okien, z których widok jest szczególnie atrakcyjny, jak i tych, które pokazują szarą rzeczywistość (rys. 1). Po raz kolejny łódzkie MS2 staje się znakomitym przykładem, gdyż wspomniane w poprzednim punkcie zamurowane okna uniemożliwiają spoglądanie tak na dachy centrum handlowego, jak i na masy ludzi zaangażowanych konsumpcją. Jednocześnie twórcy muzeum zadbali o psychiczny komfort zwiedzających, którzy potrzebują odpoczynku dla oczu i nóg – zachowane okna pozwalają na krótki oddech od zamkniętej przestrzeni ekspozycyjnej i wyglądnięcie na najmniej ruchliwą ulicę.

Podobna chęć stworzenia innego, odciętego od rzeczywistości świata, może się pojawić w muzeach z wystawami o charakterze narracyjnym lub w centrach edukacyjnych, wyposażonych w liczne, często widowiskowe albo wręcz krzykliwe multimedia. Dzieje się tak z kilku względów. Po pierwsze, jeśli celem jest zbudowanie iluzji podróży w czasie, okna wychodzące na świat zewnętrzny zaburzałyby tę teatralizującą kreację. Przykładem takiego rozwiązania jest Muzeum Browaru Żywiec. Ten sam mechanizm sugeruje wykreowanie atmosfery intelektualnego skupienia w naukowych „black spaces” [2]. W takich miejscach duża liczba ruchomych elementów i miejsc wykonywania doświadczeń zazwyczaj sugeruje, tak jak w Młynie Wiedzy w Toruniu, wizualne odcięcie strefy ekspozycji od świata zewnętrznego.



Rys. 1. Okna w obiektach poprzemysłowych adaptowanych na muzea. Górny rząd – wnętrza. Dolny rząd fragmenty elewacji. (kolejno: A.MS2 – brak śladu okien, B. Muzeum Wisły, C. „Elektrownia” w Czeladzi, D. Elektrownia w Radomiu, E. Centralne Muzeum Włókiennictwa, bud D, F. Nowe Muzeum Śląskie, G.-H. MS2, 10. Muzeum powstania Warszawskiego, I. „Zajezdnia Sztuki” w Szczecinie)

Fig. 1. Windows in postindustrial monuments transformed into museums. Higer – insides. Lower - outside

2.3. Zmiana wymiarów okna

Kolejną potrzebą w muzeum jest wygenerowanie strefy wejściowej adekwatnej do liczby zwiedzających i do rangi lub aspiracji inwestora. Przykładem takiej zmiany jest interwencja w Centralnym Muzeum Włókiennictwa w Łodzi. Tego typu modyfikacje są konsekwencją urbanistycznej ewolucji otoczenia budynku, ale mogą być również podyktowane, tak jak w MS2, pragnieniem otwarcia się na pieszych napływających z dwóch niemal równoprawnych kierunków. Od północy, od strony placu, w trzech skrajnych osiach usunięto podokienniki i jeden pas nadproży. W efekcie uzyskano wysokie na dwie kondygnacje przeszklenia sygnalizujące miejsce wejścia do wysokiego holu. Od przeciwległej strony dostęp na drugą kondygnację wprost do muzealnej kawiarni, gwarantuje kładka prowadząca poprzez kolejne przekształcone fragmenty elewacji. Elementem, który podkreśla interwencję, jest zmiana rysunku okna oraz proporcji profili tych przeszkleń. Wysokie przeszklenia o równie smukłych ramach i szprosach, najpewniej były bardzo drogie do wykonania lub żadna z firm podwykonawczych nie posiadała technologii odpowiedniej do wykonania takiego przeszklenia.

Ze względów funkcjonalnych do usuwania podokienników dochodzi niezwykle często szczególnie w budynkach, w których adaptacja polega wyłącznie na przebudowie wnętrza. Sytuacją korzystną dla zachowania oryginalnych proporcji otworów okiennych może się okazać kubaturowa rozbudowa zabytku połączona z wykreowaniem strefy wejściowej w nowej części. Tak postąpiono w Mazowieckim Centrum Sztuki Nowoczesnej w Radomiu i w Galerii „Elektrownia” w Czeladzi.

3. Ekonomia w muzeum a okno muzealne

3.1. Wymiana czy zachowanie

Zagadnienie finansowania muzeów zostało pod wieloma względami omówione w publikacji [3]. Temat ten w dalszym ciągu wymaga badań, o czym mogą świadczyć chociażby kontrowersje, które budzi zagadnienie opłacalności lokowania muzeów w obiektach zabytkowych. Głos w tej sprawie zabrał między innymi Andrzej Kicinski twierdzący, iż adaptacja obiektu zabytkowego jest tańsza i mniej czasochłonna niż wzniesienie nowego obiektu [4]. Wypowiedział się na ten temat także Jerzy Ebing, według którego odmienne oczekiwania inwestora, użytkownika i konserwatora podwyższają koszty o 50 a nawet 100% [5]. Według przeprowadzonych badań wzniesienie jednego metra kwadratowego nowego obiektu muzealnego w Polsce to koszt od 3 800 zł/m² do 13 500 zł/m². Adaptacja budynków przemysłowych to wydatek od 2 900 zł/m² do prawie 10 600 zł/m². Dalsze rachunki, oparte o polskie realizacje przeprowadzone w latach 2004-2014, wykazały, że średni koszt wzniesienia jednego metra kwadratowego nowego muzeum i adaptacji obiektu przemysłowego to niemal te same kwoty, a dokładnie około 8 tysięcy złotych [6]. Koszty wielu adaptacji byłyby jednak znacznie wyższe, gdyby większy nacisk położono na jakość prowadzonych przy nich zabiegów konserwatorskich. Zastrzeżenia budzą przede wszystkim przypadki, w których zrezy-

gnowano z zachowania oryginalnych detali. W około 60% badanych muzeów stare okna wymieniono na nowe. W tych przypadkach zysk ze sprzedaży pofabrycznego złomu mógł przynajmniej częściowo rekompensować koszt demontażu. Wymiana tych okien będzie droższa niż instalacja okien w zupełnie nowym gmachu jedynie ze względu na konieczność skopiowania pierwotnych podziałów poprzez wprowadzenie dodatkowych szprosów lub wykonanie wieńczącego je łuku.

Inne rozwiązania dotyczące okna muzealnego, uwzględniające nie tylko wizualny aspekt zachowania zabytku, są jednak droższe niż wykonanie nowej przegrody. Staranne oczyszczenie, malowanie, nowe szklenie, wykonanie krat antywłamaniowych niewątpliwie zwiększa koszty inwestycji. Wydawać by się mogło, że bardziej kosztowne powinny być te realizacje, w których zastosuje się zdwojony układ zachowujący dawne okno przy jednoczesnym zastosowaniu nowego wewnętrznego skrzydła. Nie jest to jednak pewne, gdyż przy zachowaniu zabytkowego okna estetyczne oczekiwania dotyczące nowej części są znacznie mniejsze. Takie okno nie musi mieć specjalnych ram i indywidualnie zamawianych profili szprosów. Jednocześnie wydłuża się lista firm mogących dostarczyć takie okno, co także powinno obniżyć koszty. Potwierdzają to przykłady z tczewskiego Muzeum Wisły i Muzeum Powstania Warszawskiego, w których sprawnie rozwiązano problem koegzystencji starej i nowej przegrody.

W przypadku całkowitego uwolnienia się od poglądu, iż zabytek a także muzeum muszą odpowiadać tym samym kanonom estetycznym co nowy budynek koszty inwestycji gwałtownie maleją. Świadczy o tym przykład oddziału Muzeum im. Leona Wyczółkowskiego „Explozeum” w Bydgoszczy, w którym wykonano nowe okna, a te zachowane jedynie zabezpieczono przed dalszą korozją, nie wykonując w nich uzupełnień i korekt geometrii. Zabezpieczeniu uległy jedynie elementy opraw okiennych stwarzające ryzyko zranienia nieuważnego użytkownika. Koszt tej adaptacji wyniósł jedynie 2 900zł/m². W innych przypadkach, szczególnie tam gdzie presja ujednolicenia elewacji była duża, zwiększanie skali finansowania okazywało się odwrotnie proporcjonalne względem zachowania autentyczności zabytku.

3.2. Koszty eksploatacji

Odrębnym aspektem ekonomicznym są koszty eksploatacji. Przyjmując wyłącznie to kryterium, logika nakazywałaby wymianę starych okien na nowe. Nieekonomiczne jest dogrzewanie lub obniżanie temperatur w pomieszczeniach, w których nie wymieniono okien zgadzając się na ich niską izolacyjność termiczną. Bardziej kosztowne jest utrzymywanie zabytkowego okna w satysfakcjonującym stanie technicznym i wizualnym. W przypadku zdwojenia układu okiennego, zachowanie oryginału przy jednoczesnym wstawieniu nowego okna, także okazuje się rozwiązaniem droższym i mniej wygodnym w konserwacji. Problemy może sprawiać chociażby sposób czyszczenia takich wieloelementowych detali. Z drugiej strony i z tym aspektem część projektantów poradziła sobie wyśmienicie. W Muzeum Powstania Warszawskiego pozbawioną szyb ramę wymontowano przesuując ją znacznie w stronę lica muru, z tyłu zaś zamontowano okna o no-

wych podziałach. Pochyły profil ceramicznych podokienników wraz z przesunięciem umożliwił bezkolizyjnie odprowadzanie wody z opadów atmosferycznych jak i mycie, gdyż okna znajdują się na parterze. Natomiast w Muzeum Wisły w Tczewie stare ramy zamontowano na styk, ale nowe okna są w pełni otwierane, a w celu odprowadzenia wody skrócono jedną ze środkowych kwater.

3.3. Estetyka budynku a jego potencjał marketingowy

W większości adaptowanych fabryk, w momencie podjęcia rewitalizacji nie wszystkie okna są w tym samym stanie. Najczęściej duży odsetek jest uszkodzony, inne stały się łupem złomiarzy lub zostały wyparte przez plastikowych następców jeszcze zanim zyskały rangę zabytkowych. Ten stan rzeczy często zniechęca projektantów i konserwatorów do poszukiwania indywidualnych rozwiązań. Odstręczać to może również przyszłych użytkowników, którzy nie są skory do estetycznego kompromisu idącego za patchworkowym zestawieniem starych i nowych okien, jaki można zaobserwować na przykład w Mazowieckim Centrum Sztuki „Elektrownia” w Radomiu – występuje tam zabytkowa stolarka, okna drewniane oraz okna wymienione w latach 90-tych XX wieku. Wynika to z przekonania, że wizualna atrakcyjność obiektu przełoży się na zainteresowanie ekspozycją kryjącą się wewnątrz.

Fabryka, a szczególnie ta XIX wieczna, nie zawsze kojarzy się z czystą bielą, błyskiem metalu, przejrzystymi lub lustrzanymi oknami. Wiele procesów produkcji wiązało się z dużym zapyleniem. To aspekt estetycznie utrudniający starania konserwatorów o zachowanie oryginalnej struktury. Powyginane, wyszczerbione, pożółkłe, popękane, zardzewiałe elementy mogą nie odpowiadać oczekiwaniom inwestorów, którzy czasem chcieliby zamiast zabytku posiadać lub zarządzać nowym, z wszech miar nowoczesnym gmachem. Chęć ujednoczenia lub zmiany wyglądu elewacji może być motywowana przez ambicje wytworzenia architektonicznej ikony miasta, posiadającej silny potencjał marketingowy. W tym momencie trudno jest mówić o wypracowanym konsensusie funkcjonalno-ekonomiczno-konserwatorskim.

Czasem jednak efekt plastikowego zabytku jest wynikiem pośpiechu, nieprzemyślanych decyzji, niedorachowania inwestycji lub braku doświadczenia. Co łatwo zaobserwować przyglądając się fasadzie „Zajezdni Sztuki” w Szczecinie.

4. Podsumowanie

W efekcie podejmowanych kompromisów adaptacyjnych żadne ze środowisk zaangażowanych w ten proces nie jest w pełni zadowolone. Architektom brakuje nowych wyzwań. Muzealnicy chcieliby uwolnić się od ciężaru zależności od zabytkowej struktury i dyskomfortu związanego z użytkowaniem nieidealnego narzędzia przechowywania zbiorów. Najbardziej jednak niezadowoloną grupą jest środowisko konserwatorskie, „które ma prawo czuć się ignorowane” [7]. Ich racje, mimo że wyraźnie zapisane w ustawach i rozporządzeniach, nie są w stanie pokonać ekonomicznego i najczęściej zdroworozsądkowego nacisku ze strony tych, którzy w inny sposób wyznaczyli swoje priorytety. Wydaje się, że nawet najlepsze

prawo nie jest w stanie zmienić tego stanu. Drogą do innego prowadzenia rozmów, w wyniku których podejmowane będą rzeczywiste kompromisy, to próba wzajemnego odkrycia logiki innych grup zawodowych. Problem braku porozumienia dotyczy zarówno ogólnego pojmowania zjawiska adaptacji jak i detali, w tym wypadku okien. W budowaniu zrozumienia pomiędzy tymi środowiskami pomocną byłaby całkowita przejrzystość procesów uzyskiwania odstępstw od przepisów budowlanych i procedur konsultacji z Konserwatorem Zabytków. Znając pełną argumentację byłoby nam łatwiej zrozumieć racje innych ekspertów. Jest to tym bardziej uzasadnione, jeżeli dotyczy rewitalizacji subwencjonowanych ze środków publicznych, a także muzeów, które w Polsce są w większości placówkami publicznymi.

Literatura

- [1] Modyński K, Percepcja wystawy a kształtowanie przestrzeni ekspozycyjnej, *Muzealnictwo* 2015 (56) s. 150.
- [2] Toon R., Black box science In Black box centres, w: Ed. Susanne MacLeond, *Reshaping Museum Space, architecture, design, exhibitions*, s. 26-38.
- [3] *Ekonomia Muzeum*, red. Folga-Januszewska D., Bartłomiej Gutowski, Warszawa 2011.
- [4] Kiciński A., *Muzea. Strategie i dylematy rozwoju*, Warszawa 2004, s. 76.
- [5] Ebing J. S. *Nowe funkcje budowli inżynierskich* w: „Zawód: Architekt” 01.2010.
- [6] Rusnak M, *Ekonomia transformacji obiektów poprzemysłowych dla potrzeb muzealnych i ekspozycyjnych w Polsce w latach 2000-20014*, w: *Miasto przyjazne mieszkańcom, Pro-Revita Łódź* 2016, s. 46-68.
- [7] Szmygin B. red., *Wartość funkcji w obiektach zabytkowych*, PKN ICOMOS, Muzeum Pałac w Wilanowie, Warszawa 2014.
- [8] Walczak B., Kurzac A., *Problems of restoration of window frames in the 19th century industrial facilities on the example of Łódź*, w: *Civil and Environmental Engineering Reports*, No. 9 2012, s. 153-164.

THE IMPACT OF FUNCTIONALITY, ECONOMY, AND PSYCHOLOGY ON THE MUSEUM WINDOW IN HISTORIC POSTINDUSTRIAL BUILDINGS

Summary

The design, construction and arrangement of a museum in historical postindustrial buildings is a complex, multifaceted process. It often requires a serious compromise between the desire to keep the original building intact and the need to provide both the exhibition and the visitors with the most convenient and suitable conditions. One of such dilemmas is related to the problem of windows. Apart from legal issues, one should bear in mind problems of functionality, economy and psychology of perception, and that is why they will be the focus point of this paper. What will be presented are the most important features related both to the construction process and the further, multilayered functioning of the museum. The issue will be analyzed with reference to different solutions that were applied in Polish investments in the years 2004-2015.

Keywords: window, adaptation, museum, postindustrial buildings, aesthetics, economy, exhibition perception

Przesłano do redakcji: 2.06.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Marta OLESZKO¹
Vyacheslav PISAREV²

ANALIZA SYSTEMU WENTYLACJI Z RECYRKULACJĄ POWIETRZA ORAZ KRZYŻOWYM WYMIENNIKIEM CIEPŁA W OKRESIE ZIMOWYM

Celem pracy jest opracowanie metody projektowania systemu wentylacji wraz z dwustopniowym odzyskiem ciepła z zastosowaniem recyrkulacji powietrza oraz krzyżowego wymiennika ciepła. Głównym problemem obliczeniowym pracy, było określenie na wykresie i-x powietrza wilgotnego, stanu powietrza uzyskanego w wyniku mieszania się strumieni powietrza świeżego i recyrkulowanego. Trudność ta wynikała z zaproponowanej kolejności elementów centrali wentylacyjnej. Zróżnicowanie elementów polegało na występowaniu krzyżowego wymiennika ciepła po komorze mieszania. W analizowanej metodzie powietrze wywiewane przepływa przez krzyżowy wymiennik ciepła gdzie się ochładza, a następnie dzieli na dwa strumienie – powietrza wywiewanego i recyrkulowanego. Kolejno strumień obiegowy przepływa przez przepustnicę powietrza recyrkulowanego i trafia do komory mieszania, Łączy się tam z powietrzem świeżym i przepływa do rekuperatora. W wymienniku ciepła następuje przekazanie ciepła strumieniowi nawiewanemu, odzyskanego ze strumienia wywiewanego. W opracowaniu przy bardzo niskich temperaturach zewnętrznych możliwe jest zastosowanie nagrzewnicy wstępnej w celu podgrzania powietrza zewnętrznego. Zaletą przedstawianego rozwiązania jest to, że przed rekuperatorem powietrze recyrkulowane miesza się ze świeżym. W wyniku przeprowadzonej analizy obliczeniowej stwierdzono, że przedstawiona metoda z mieszaniem powietrza świeżego i recyrkulowanego przed krzyżowym wymiennikiem ciepła może być wykorzystana przez przyszłych projektantów instalacji wentylacyjnych.

Słowa kluczowe: odzysk ciepła, centrala wentylacyjna, komora mieszania, wykresy i-x powietrza wilgotnego

1. Centrale wentylacyjne z dwustopniowym odzyskiem ciepła

Stan powietrza w budynkach użyteczności publicznej charakteryzuje się temperaturą, wilgotnością, prędkością powietrza, a nawet stopniem zanieczyszczenia. W zależności od ich przeznaczenia rozbieżności między różnymi parametrami

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Marta Oleszko, tel. 880896676; martaoleszko@gmail.com

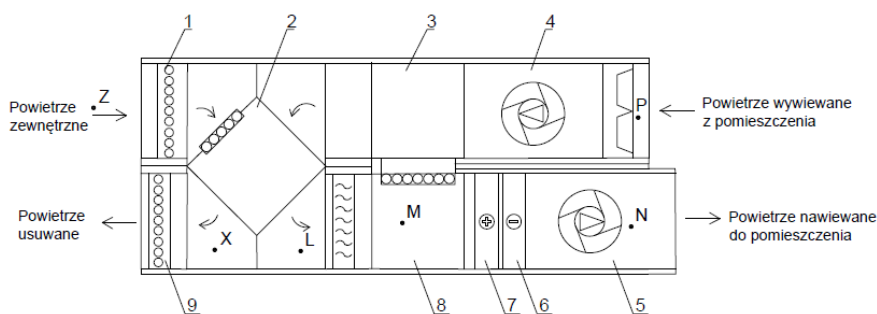
² Vyacheslav Pisarev, Politechnika Rzeszowska, Zakład Ciepłownictwa i Klimatyzacji, Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów; tel. 178651946; pisarev@prz.edu.pl

powietrza są bardzo duże. Stosowane w tych pomieszczeniach centrale wentylacyjne muszą utrzymać stan powietrza zgodny z Polskimi Normami. Odzysk ciepła z wywiewanego powietrza zapewnia ekonomię energii oraz komfort cieplny osób przebywającym w pomieszczeniu. Należy jednak pamiętać, że odczuwane parametry powietrza tj. wilgotność, czystość czy temperatura są cechami indywidualnymi. Ich otrzymanie wymaga optymalnego doboru nie tylko rodzaju czy wielkości centrali wentylacyjnej ale również i występujących w niej rekuperatorów [1].

Celem publikacji jest analiza metody projektowania systemu wentylacji wraz z dwustopniowym odzyskiem ciepła z zastosowaniem recyrkulacji powietrza oraz krzyżowego wymiennika ciepła. W branży instalacyjnej wyróżnia się wiele firm, które w swojej ofercie mają centrale wentylacyjne z dwustopniowym odzyskiem ciepła w formie recyrkulacji i krzyżowego wymiennika ciepła. Ich cechą charakterystyczną jest występowanie odzysku ciepła poprzez zastosowanie krzyżowego wymiennika ciepła w centrali przed recyrkulacją (rys. 1, 2) [2, 3].

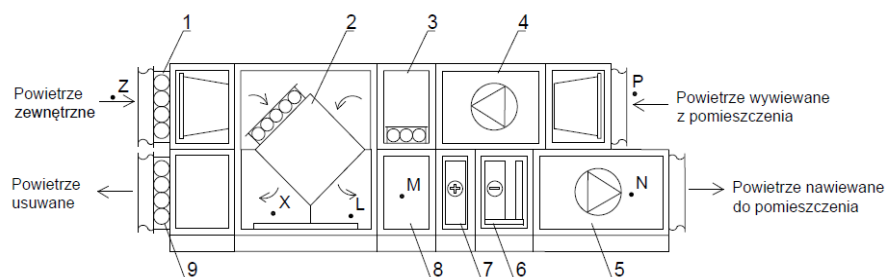
Punkty stanu powietrza Z, N, X, M, P, L na rys. 1, 2 odpowiadają punktom stanu powietrza na wykresie i-x powietrza wilgotnego (rys. 3).

Na rysunku 3 zaznaczono następujące procesy: ZL - przejście powietrza zewnętrznego przez krzyżowy wymiennik ciepła (2), LP - zmieszanie powietrza świeżego z powietrzem recyrkulowanym, MN - ogrzanie powietrza poprzez nagrzewnicę (7), NP- zmiana stanu powietrza w pomieszczeniu, PX- zmiana stanu powietrza wywiewanego w krzyżowym wymienniku ciepła (2). Punkt M określa stan powietrza po wymieszaniu w komorze mieszania (8) powietrza recyrkulowanego z powietrzem zewnętrznym.



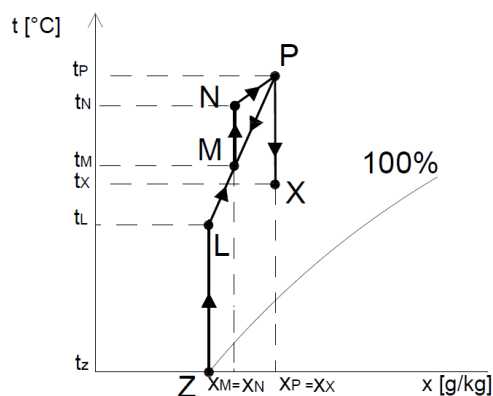
Rys. 1. Centrala wentylacyjna firmy VTSClima z recyrkulacją powietrza i krzyżowym wymiennikiem ciepła, na podstawie [2]; 1 – przepustnica powietrza zewnętrznego, 2 – krzyżowy wymiennik ciepła, 3 – komora z przepustnicą powietrza recyrkulowanego, 4 – wentylator wywiewny, 5 – wentylator nawiewny, 6 – chłodnica, 7 – nagrzewnica, 8 – komora mieszania, 9 – przepustnica powietrza usuwanego

Fig. 1. VTSClima air handling unit with air recirculation and cross-flow heat exchanger, based on [2]; 1 – air damper outside, 2 – cross-flow heat exchanger 3 – chamber with recirculated air damper, 4 – exhaust fan, 5 – supply air fan, 6 – cooler, 7 – heater, 8 – mixing chamber, 9 – extract air damper



Rys. 2. Centrala wentylacyjna firmy Clima Gold z recyrkulacją powietrza i krzyżowym wymiennikiem ciepła, na podstawie [3]. Opis zgodny z rys. 1

Fig. 2. Clima Gold air handling unit with air recirculation and cross-flow heat exchanger, based on [3]. Description of the figure is consistent with Fig. 1

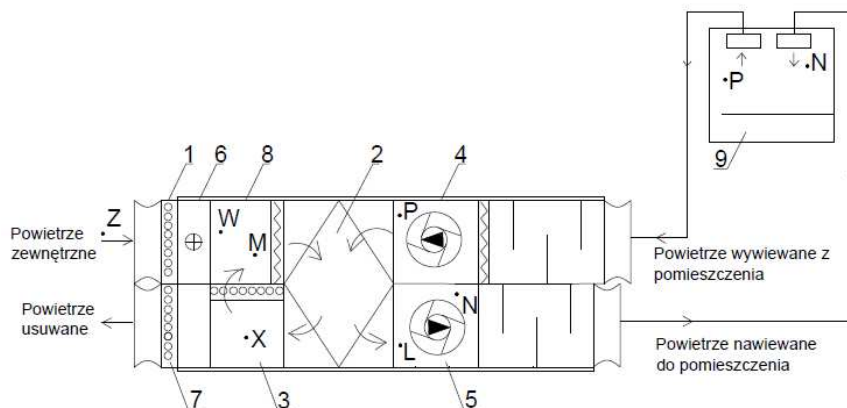


Rys. 3. Przebieg zmian stanu powietrza na wykresie i-x powietrza wilgotnego w okresie zimowym

Fig. 3. The process of changes in the air quality in winter on the graph i-x of the moist air

W pracy zaproponowano nowe rozwiązanie centrali wentylacyjnej polegającej na odzysku ciepła przez zastosowanie recyrkulacji powietrza przed krzyżowym wymiennikiem ciepła (rys. 4).

Punkty stanu powietrza Z, W, M, L, N, P, X na rys. 4, odpowiadają punktom stanu powietrza na wykresie i-x powietrza wilgotnego (rys. 5). Powietrze wywiewane przepływa przez krzyżowy wymiennik ciepła (2, rys. 4) gdzie następuje jego ochłodzenie. Następnie powietrze jest dzielone na dwa strumienie (strumień powietrza wywiewanego oraz strumień powietrza recyrkulowanego) w zależności od panujących warunków wewnętrznych i zewnętrznych. Strumień obiegowy, przepływa przez przepustnicę powietrza recyrkulowanego i trafia do komory mieszania (8). Tutaj następuje mieszanie powietrza świeżego z recyrkulowanym, a później skierowanie go do rekuperatora (2). W urządzeniu następuje przekazanie ciepła strumieniowi nawiewanemu odzyskanego ze strumienia wywiewanego. W opracowaniu przy bardzo niskich temperaturach zewnętrznych



Rys. 4. Centrala wentylacyjna z recyrkulacją powietrza wewnętrznego i krzyżowym wymiennikiem ciepła, pracująca w okresie zimowym. Opis elementów na rys. 4: 1÷5 zgodny z rys. 1, 6 – nagrzewnica wstępna, 7 – przepustnica powietrza wywiewanego, 8 – komora mieszania, 9 – wentylowane pomieszczenie

Fig. 4. Functioning of the air handling unit with indoor air recirculation and cross-flow heat exchanger in winter. Description of the elements in the drawing no 4: 1÷5 in line with the drawing no 1, 6 – preheater, 7 – extract air damper, 8 – mixing chamber, 9 – ventilated room

możliwe jest zastosowanie nagrzewnicy wstępnej (6) w celu podgrzania powietrza zewnętrznego. Zaletą przedstawianego rozwiązania jest to, że przed rekupe ratorem powietrze recyrkulowane miesza się ze świeżym. Wskutek tego powietrze nawiewane na krzyżowy wymiennik ciepła w naszym przypadku nie trzeba dodatkowo podgrzewać nagrzewnicą pomocniczą (6 rys. 4) eliminując tym samym przypadek zamarznięcia wymiennika.

2. Zasady projektowania zmian stanu powietrza w systemach wentylacyjnych z dwustopniowym odzyskiem ciepła

Głównym problemem obliczeniowym jest określenie stanu powietrza uzyskanego w wyniku mieszania się strumieni powietrza świeżego i recyrkulowanego na wykresie i-x powietrza wilgotnego (punkt M, rys. 5). Trudność ta wynika z zaproponowanej kolejności elementów centrali wentylacyjnej. Zróżnicowanie polega na występowaniu krzyżowego wymiennika ciepła po komorze mieszania. W literaturze i katalogach firm nie przedstawiono przykładowej metody projektowania procesów uzdatniania powietrza dla tego typu ułożenia elementów układu. Pominięcie tak istotnej analizy może zniechęcić przyszłych projektantów i eksploataatorów do zastosowania takiego rozwiązania.

Dane wejściowe (okres zimowy)

- Parametry powietrza zewnętrznego wg [4]: temperatura zewnętrzna - t_z [°C], zawartość wilgoci - x_z [g/kg];
- Parametry powietrza wewnętrznego wg [5]: temperatura w pomieszczeniu - t_p [°C];
- Parametry technologiczne: założona liczba osób - n [os], zyski ciepła całkowitego - Q_c [kW], zyski wilgoci - W [kg/s], całkowity strumień powietrza określony w okresie letnim - V_c [m³/h], strumień powietrza recyrkulowanego - V_{rec} [m³/h], wymagany strumień powietrza zewnętrznego uwzględniający ilość osób - V_{san} [m³/h] ($V_{san} + V_{rec} = V_c$).

Projektowanie procesów obróbki powietrza w systemie wentylacji z recyrkulacją powietrza wywiewanego oraz krzyżowym wymiennikiem ciepła pracującego w okresie zimowym (rys. 4), rozpoczynamy od zaznaczenia stanu powietrza zewnętrznego – punkt Z (ϕ_z, t_z) na (rys. 5) zgodnie z danymi wejściowymi. Następnie określamy położenie punktu P. Zawartość wilgoci w pomieszczeniu obliczamy na podstawie wzoru:

$$x_p = x_z + W / (V_{san} \cdot \rho) \text{ [g/ kg]} \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza [kg/m³].

Na przecięciu linii zawartości wilgoci x_p i temperatury t_p wyznaczamy stan powietrza w pomieszczeniu określony punktem P (rys. 5).

Współczynnik kierunkowy procesu uzdatniania powietrza w pomieszczeniu obliczamy ze wzoru:

$$\varepsilon = Q_c / W \text{ [kJ/kg]} \quad (2)$$

Jako wariant możemy obliczyć moc nagrzewnicy wstępnej (6, rys. 4), która przez ogrzanie powietrza zewnętrznego zapobiega zamarznięciu krzyżowego wymiennika ciepła (2, rys. 4):

$$Q_N = V_{san} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_w - t_z) \text{ [kW]} \quad (3)$$

gdzie: c_p – pojemność cieplna właściwa powietrza przy stałym ciśnieniu [kJ/(kg · °C)], t_w -temperatura uzyskana po zastosowaniu nagrzewnicy wstępnej (punkt W, rys. 5), można ją przyjąć w granicach $t_w = 0 \div -5^\circ\text{C}$.

Zakładamy współczynnik sprawności krzyżowego wymiennika ciepła η_t na podstawie danych katalogowych. Wartość ta jest zależna od różnicy temperatur między strumieniami powietrza, ich udziałów oraz wilgotności.

Stan powietrza uzyskany w wyniku mieszania strumieni powietrza świeżego i recyrkulowanego (punkt M rys. 5) określamy stosując metodę kolejnych przybliżeń, wynikającej z porównania wiadomych wzorów [6]:

$$t_L - t_M = \eta_t \cdot (t_p - t_M) \quad (4)$$

my do przekształconego wzoru (5) otrzymując temperaturę dla punktu L przedstawiającego stan powietrza po krzyżowym wymienniku ciepła.

Wyznaczenie położenia punktu L dokonujemy poprzez przecięcie się linii zawartości wilgoci $x_M = \text{const}$ i wyliczonej temperatury t_L .

Parametry powietrza nawiewanego punkt N wyznaczamy na przecięciu się linii zawartości wilgoci x_M ($x_M = x_N = \text{const}$) oraz prostej kierunkowej $\varepsilon = \text{const}$ przechodzącej przez punkt P. Jeżeli punkt L leży poniżej punktu N należy po krzyżowym wymienniku ciepła zastosować nagrzewnicę pomocniczą.

Przykład

Dane wejściowe (okres zimowy)

- Parametry powietrza zewnętrznego wg [4]: temperatura zewnętrzna - $t_z = -20^\circ\text{C}$, zawartość wilgoci - $x_z = 0,8 \text{ g/kg}$;
- Parametry powietrza wewnętrznego wg [5]: temperatura w pomieszczeniu - $t_p = 20^\circ\text{C}$;
- Parametry technologiczne: założona liczba osób - 60 os, zyski ciepła całkowitego - $Q_c = 14,76 \text{ kW}$, zyski wilgoci - $W = 3,18 \text{ kg/h} = 8,83 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$, całkowity strumień powietrza określony w okresie letnim - $V_c = 7380 \text{ m}^3/\text{h}$, wymagany strumień powietrza zewnętrznego - $V_{\text{san}} = 1800 \text{ m}^3/\text{h}$, strumień powietrza recyrkulowanego - $V_{\text{rec}} = 5580 \text{ m}^3/\text{h}$.

Projektowanie procesów obróbki powietrza rozpoczynamy od zaznaczenia na wykresie i-x powietrza wilgotnego stanu powietrza zewnętrznego - punkt Z (rys. 6), zgodnie z danymi wyjściowymi. Kolejno zgodnie ze wzorem (1) obliczamy zawartość wilgoci w pomieszczeniu:

$$x_p = 0,8 \text{ g/kg} + ((3,18 \text{ kg/h}) / (1800 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3)) \cdot 1000 = 2,27 \text{ g/kg}$$

Następnie na przecięciu linii zawartości wilgoci $x_p = 2,27 \text{ g/kg}$ i temperatury $t_p = 20 \cdot ^\circ\text{C}$ wyznaczamy stan powietrza w pomieszczeniu (punkt P rys. 6).

Określenie współczynnika kierunkowego procesu uzdatniania powietrza w pomieszczeniu dokonano na podstawie równania (2):

$$\varepsilon = (10,58 \text{ kW} \cdot 3600) / 3,18 \text{ kg/h} = 11977 \text{ kJ/kg}$$

Jako możliwy wariant, określono moc nagrzewnicy wstępnej (6, rys. 4) zgodnie ze wzorem (3):

$$Q_n = 0,5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C})) = 12 \text{ kW}$$

Założenie wymaganej sprawności krzyżowego wymiennika ciepła dokonano na podstawie katalogu firmy VTS Clima [2]. Przyjęto sprawność krzyżowego wymiennika ciepła na poziomie $\eta_t = 52\%$. Stosując metodę kolejnych przybliżeń, wynikającej z porównania wiadomych wzorów (4) i (5), określamy stan powietrza uzyskany w wyniku mieszania strumieni powietrza świeżego i recyrkulowanego (punkt M rys. 6). Do wzoru (6) podstawiamy wartości temperatur

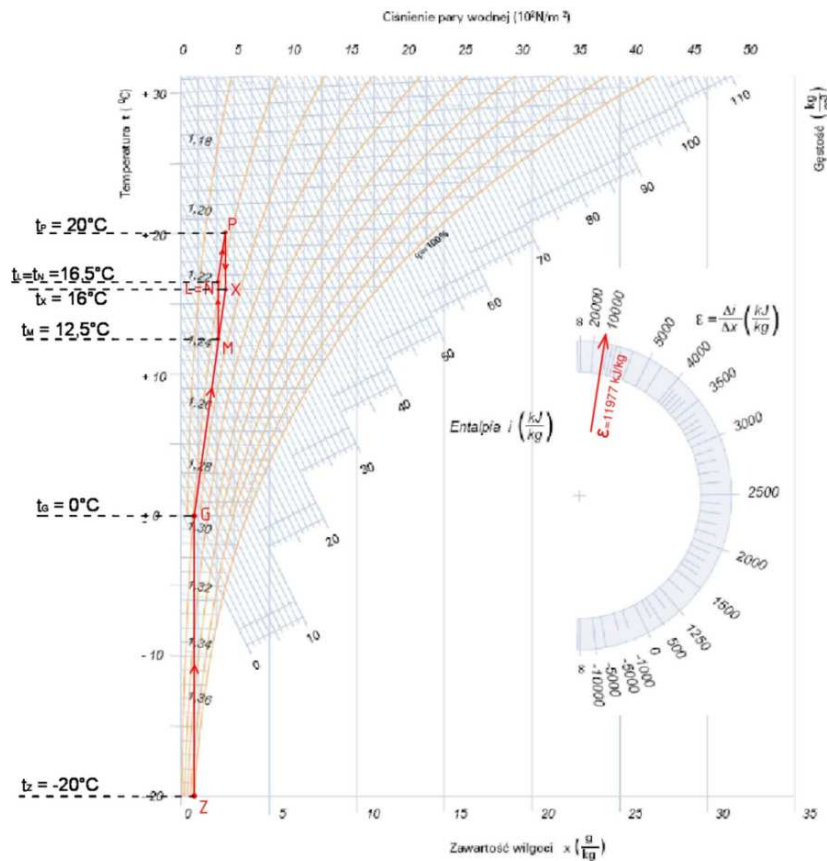
punktów X i M ($t_X = 16^\circ\text{C}$ i $t_M = 12,5^\circ\text{C}$) powstających po przecięciu się założonej temperatury t_X ($x_X = x_P = \text{const}$) oraz punktu W i sprawdzamy zgodność obu stron równania:

$$-12,5^\circ\text{C} \cdot 0,52 + (0,52 - 1) \cdot 20^\circ\text{C} = -t_X$$

$$-16^\circ\text{C} = -16^\circ\text{C}$$

Mając daną temperaturę w punkcie M, z wykresu i - x powietrza wilgotnego (rys. 6) odczytujemy dla niego parametry stanu powietrza. Następnie z przekształconego wzoru (5) obliczamy temperaturę dla punktu L:

$$t_L = 20^\circ\text{C} + 12,5^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C} = 16,5^\circ\text{C}$$



Rys. 6. Przebieg zmian stanu powietrza wentylacyjnego na wykresie i - x powietrza wilgotnego w okresie zimowym z nagrzewnicą pomocniczą, recykulacją powietrza wewnętrznego i zastosowaniem krzyżowego wymiennika ciepła

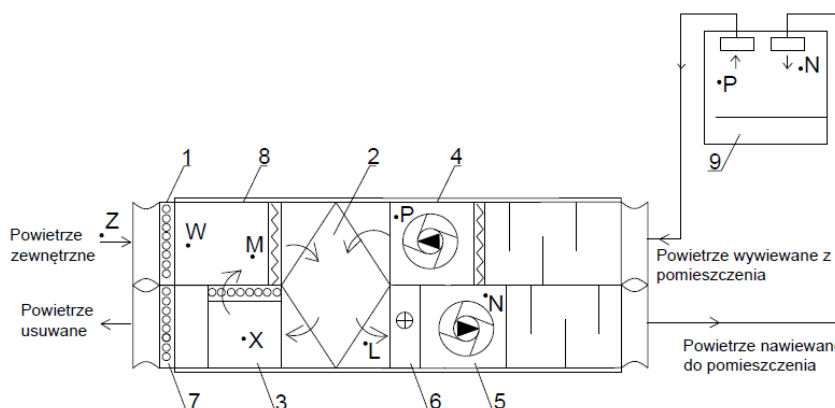
Fig. 6. The process of changes in the condition of the ventilation air in winter on the graph i - x of the moist air, with supplementary heating coil, indoor air recirculation and the use of cross-flow heat exchanger

Określenie położenia punktu L dokonujemy poprzez przecięcie linii zawartości wilgoci $x_M = 1,91$ g/kg oraz temperatury $t_L = 16,5^\circ\text{C}$.

Parametry powietrza nawiewanego (punkt N rys. 6) wyznaczamy na przecięciu się linii zawartości wilgoci $x_M = 1,91$ g/kg ($x_M = x_N$) oraz prostej kierunkowej $\varepsilon = 11977$ kJ/kg przechodzącej przez punkt P. W omawianym przykładzie punkt L pokrywa się z punktem N.

3. Wnioski

Zaproponowano instalację systemu wentylacji z recykulacją powietrza oraz krzyżowym wymiennikiem ciepła po komorze mieszania w okresie zimowym z opracowaniem metody projektowej i przykładem obliczeniowym. Wskutek wysokiej temperatury w punkcie M w większości przypadków, centrale wentylacyjne mogą być bez nagrzewnicy wstępnej. Taki układ zaproponowano na (rys. 7). Nagrzewnica pomocnicza (6. rys. 7) może być montowana po krzyżowym wymienniku ciepła, na powietrzu przepływającym do pomieszczenia.



Rys. 7. Centrala wentylacyjna z recykulacją powietrza wewnętrznego i krzyżowym wymiennikiem ciepła, pracująca w okresie zimowym. Opis elementów na rys. 7: 1÷5 – zgodny z rys. 1, 6 – nagrzewnica pomocnicza, 7 – przepustnica powietrza wywiewanego, 8 – komora mieszania, 9 – wentylowane pomieszczenie

Fig. 7. Functioning of the air handling unit with indoor air recirculation and cross-flow heat exchanger in winter. Description of the elements in the drawing no 7: 1÷5 in line with the drawing no 1, 6 – auxiliary heater, 7 – extract air damper, 8 – mixing chamber, 9 – ventilated room

Punkty stanu powietrza na Z, W, M, L, N, P, X na (rys. 7), odpowiadają punktom stanu powietrza na wykresie i-x powietrza wilgotnego (rys. 6).

W wyniku przeprowadzonej analizy obliczeniowej stwierdzono, że przedstawiona metoda z mieszaniem powietrza świeżego i recykulowanego przed

krzyżowym wymiennikiem ciepła może być wykorzystana przez przyszłych projektantów instalacji wentylacyjnych.

Literatura

- [1] <http://www.chlodnictwoiklimatyzacja.pl/artykuly/> (z dn. 28.02.2016).
- [2] <http://vtsgroup.pl/VENTUS.html> (z dn. 28.02.2016).
- [3] <http://climagold.com/wp-content/uploads/2015/12/clima-gold-katalog-2011pdf-5845.pdf>(z dn. 28.02.2016).
- [4] PN-76/B-03420: Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza zewnętrznego.
- [5] PN-76/B-03421: Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi.
- [6] V. Pisarev, Projektowanie instalacji wentylacji i klimatyzacji z rekuperacją ciepła, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2012.

ANALYSIS OF THE USE OF VENTILATION SYSTEM WITH AIR RECIRCULATION AND CROSS-FLOW HEAT EXCHANGER IN WINTER

Summary

The aim of the study is to analyze the method of designing ventilation systems with a two-stage heat recovery using air recirculation and cross-flow heat exchanger. The major computational problem in this work was presenting on the graph i-x the moist air, the quality of the air obtained by mixing fresh airstreams with recirculated airstreams. This difficulty resulted from the proposed arrangement of the air handling unit components. Diversity of the elements involved the presence of cross-flow heat exchanger after the mixing chamber. In the analyzed method, the exhausted air flows through the cross-flow heat exchanger where it cools and then divides into two airstreams - the exhaust airstream and the recirculated airstream. Then, the circulating airstream passes through the air recirculation damper and goes to the mixing chamber. There, it mixes with the fresh air and flows into the recuperator. In the heat exchanger, the heat recovered from the exhaust air is transferred to the supply airstream. In the study, at low outside temperatures, a pre-heating coil may be used in order to heat the outside air. The benefit of the provided solution is the fact that outside the recuperator, the recirculated air is mixed with the fresh air. As a result of the conducted computational analysis, it was found that the presented method based on mixing the fresh and recirculated air before flowing into cross-flow heat exchanger can be used by future designers of ventilation systems.

Keywords: heat recovery, air handling unit, mixing chamber, graph i-x of the moist air

Przesłano do redakcji: 2.06.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Anna BAZAN-KRZYWOSZAŃSKA¹
Maria MRÓWCZYŃSKA²
Marta SKIBA³

A POLICY OF DEVELOPMENT OF POST-MINING LAND ON THE EXAMPLE OF ZIELONA GÓRA

The article is an introduction to the issue of shaping post-mining areas and the former coal mine sites of Zielona Góra, (lubuskie voivodeship). One of the characteristic geological processes, shaping the current surface of the mentioned area were glaciotectionic deformations - a set of processes related to icecaps movements, that have brought the deposits of lignite near the surface. This allowed to their partial exploration in the past. In the 19th century, around Zielona Góra, several lignite mines were in use. Some of them have already been completely forgotten and no documents or information as a proof of their previous existence remained. Currently, the most important raw material in the natural surroundings of the city are natural aggregates such as sands and gravels and different kinds of ceramic raw materials (loam, clay).

The city of Zielona Góra, seeking new investment areas, develops further areas, including those that have been former mine sites for at least 70 years. The areas have not undergone reclamation, in accordance with the current procedure under the law. Although the reclamation of post-mining areas, both technical and biological, is a responsibility of a mining plant and should be consistent with the law, there have not been institutions covered by the above obligation for over 70 years.

The historical value of the city's post-mining areas, as well as the problems associated with the protection of nature and landscape, resulting inter alia from the act of 16 April 2004 on the protection of nature (Off. J. of 2015 item 1651, as amended), and the act of 24 April 2015 on amending certain acts due to the strengthening of the tools of landscape protection (Off. J. of 2015 items 774, 1688) [13], indicate a need for action, aimed at maintaining documentation and the identity of the place. All sorts of sports and leisure or park use can be provided for such areas [9]. It is necessary, however to determine the directions of development, within the documents shaping urban spatial policy, that would indicate the purpose and way of development of the mentioned areas.

Keywords: land use, urban policy, planning documents, post-mining areas and former mine sites

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Anna Bazan-Krzywoszańska, University of Zielona Góra, Faculty of Civil engineering, Architecture and Environmental Engineering, ul. Licealna 9, 65-246 Zielona Góra; A.Bazan@aiu.uz.zgora.pl

² Maria Mrówczyńska, University of Zielona Góra, Faculty of Civil engineering, Architecture and Environmental Engineering M.Mrowczynska@uz.zgora.pl

³ Marta Skiba, University of Zielona Góra, Faculty of Civil engineering, Architecture and Environmental Engineering M.Skiba@aiu.uz.zgora.pl

1. Introduction

The restoration of the degraded areas to the status of economic interest or giving them new purpose occurs by their development. In accordance with the Act of 27 March 2003 on spatial planning and development (Off. J. of 2016 item 778 as amended) [15] the legislator requires to indicate areas that need transformations or rehabilitation in the planning document, which is a municipal study of spatial development conditions and directions (article 10, paragraph 2, subparagraph 14) and in a local zoning plan, (article 15, paragraph 3, subparagraph 3). On the basis of the article 104 paragraph 1 of the Act of 9 June 2011 on the geological and mining law (Off. J. of 2016 item 1131) [17], mining areas and sites were considered as the special case of sites exposed to significant environmental effects of the activities referred to in the concessions. Due to the article 104 paragraph 2 of the act, for the sites mentioned above the legislator provides the implementation of the local zoning plan, in accordance with the act on spatial planning and development. The obligation to do so derives directly from article 72 paragraphs 1, 2 and 3 of the Act of 27 April 2001 on the environmental protection (Off. J. of 2016 item 672 as amended) [14], in which the legislator indicated that municipal planning documents, when allocating land to the certain objectives and determining the tasks related to their development in the land structure, shall consider proposals that allow the maintenance of the natural balance and the rational management of natural resources, as well as the proper living conditions. This directly resulted in the regulation that, the management of areas degraded by human activity shall be determined in the municipal planning documents.

Provision of article 129 paragraph 2 of the Act of 9 June 2011 on the geological and mining law (Off. J. of 2016 item 1131) [17] provides that the reclamation of post-mining activities land shall apply the provisions of the Farm and Woodland Conservation Act of 3 February 1995 (Off. J. of 2015 item 909 as amended) This means that the provisions of the Farm and Woodland Conservation Act shall apply in case of the reclamation of any land type of use, changed as a result of mining activities. Pos-mining land reclamation, should be carried out taking into account the principles deriving from the mentioned act.

In municipal planning and environmental documents, also in the context of indirect documents, carried out for the purposes of spatial planning and development procedures (ecophysiographic studies, estimation of an impact of planning documents on the environment) reclamation of degraded land is connected with the objective to achieve in the form of specific function, optimal for a certain land and its use [2].

Possibilities of a land remediation in a preferred direction is determined by many factors, some of which are of minor importance, while others are decisive. Among the factors determining the choice of direction of the reclamation there are following: the current way of land use, natural factors, climatic conditions, the nature and quality of the surrounding areas, hydrological conditions, soil

conditions, social-economic factors, technical-economic factors, the costs and benefits obtained in the end, as well as technical and technological feasibility of the planned investment.

Among these factors, the natural, constant in time factors, which include, such as hydrological conditions indicating the final land destination, for example water reservoir should be crucial when choosing the direction of the post-mining heading development. Soil conditions, the nature and quality of the surrounding should have additional importance only. However, in practice, technical economic factors usually have decisive influence on the scope of the remediation work [7].

2. Zielona Góra - historical background of mining areas

Zielona Góra became involved in lignite in 1838, when its deposits were discovered around the Preisler (Peisker) mill near Ochla. They were discovered by Carl Adolph Pohlenz, a merchant from Zielona Góra, whose name in the 1930s of the 20th century was given to one of the most important deposits of these areas and to a mining shaft. Another study, carried out in the city and in the surrounding area, showed the presence of the local deposits of lignite, mostly in the South-western part, and near the city boundaries. As a result, in the 19th century, several lignite mines were in use around Zielona Góra. Some of them have already been completely forgotten and no documents or information about them left.

Lignite around Zielona Góra occurs most commonly under loams, which were used as a raw material for bricks manufacture. Mines had very small extraction and fulfilled only local needs of the inhabitants of the surrounding villages or local industry such as a brickyard (figs 1, 2). Pre-war mining plants produced coal, building wooden adits that were deconstructed after the completion of the deposit exploration, which has made an extraction of coal possible after the war, especially in forest areas. These mines due to the industry development and an increase in production by larger, more competitive mines were becoming unprofitable. Most of them ran the operation by several-decades, using one deposit. Therefore, it is very difficult to find the exact location of some of them.

According to the inventory of industrial plants, in 1936 there were the following underground lignite mines in the surroundings of Zielona Góra:

- a) „Consolidierte Grünberger Gruben”, Grünberg (Zielona Góra),
- b) „Braunkohlenwerk „Ferdinandsgrube“, Loos bei Grünberg (Łazy),
- c) „Consolidierte Emmagrube“, Bielitz bei Freystadt (Bielice Kozuchowskie),
- d) Inactive mine "Freia" in Niesky bei Rothenburg (Nietków near Czerwieńsk) (fig. 1).

The largest and longest-running mine in the area were "United Mines of Zielona Góra", or "Konsolidierte Grünberger Gruben" that were active apart from the city area, also in Rybno, Wilkanów, Świdnica, Letnica and Słone (fig. 1). The mines of Zielona Góra were subject to the authority of Mining Office in Zgorzelec, which managed area from Zgorzelec through Greater Poland

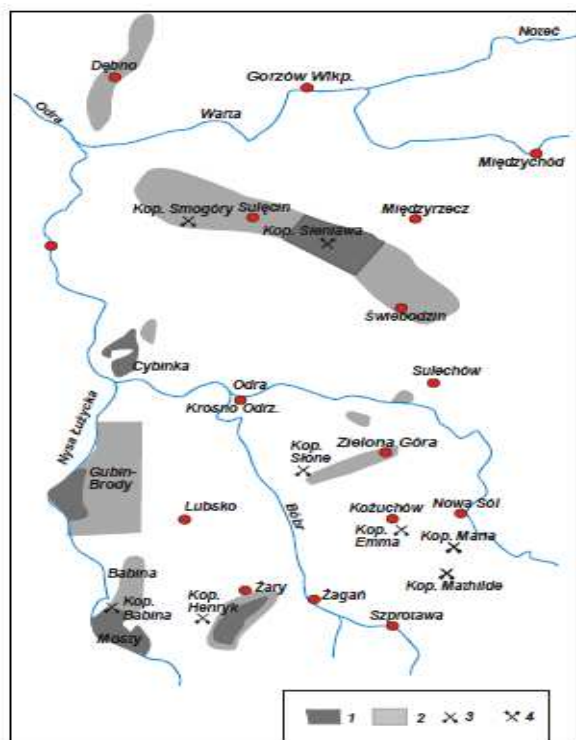


Fig. 1. Deposits of lignite in Lubuskie: 1 – documented, 2 – deposits of perspective, 3 – significant closed mines, 4 – active mines. Source: [5, p. 47]

Rys. 1. Złóża węgla brunatnego na terenie Ziemi Lubuskiej: 1 – złożo udokumentowane, 2 – złoża perspektywiczne, 3 – ważniejsze nieczynne kopalnie, 4 – czynne kopalnie. Źródło: [5, s. 47]

to East Prussia, being the part of the District of Wrocław. Development of open-cast lignite mines in Lusatia, less than 100 km from Zielona Góra, as a cheaper production started the decline of the mines of Zielona Góra. Their closure was announced at the end of 1937, however, the last legal excavations are dated 1945-1946, when the electricity supply from Frankfurt stopped, and delivery of coal from Silesia delayed [5].

Mysteriously, the history of mining and the extraction of lignite in the city of Zielona Góra has almost been completely forgotten, and the evidence is the fact that this topic was the subject of research, even in the context of the regional history, in a very small amount. Also the archives has not kept much of records concerning the mines and their way of functioning in these lands [3, 4].

3. Documents shaping urban spatial policy

The development of the urban space of Zielona Góra, in the postwar period was subordinated to the development of the main transportation routes. Residen-

tial areas, after filling in undeveloped areas within the existing urban structure were, in most cases, developed by multifamily residential settlements. Since 1950 they took place of vine and fruit growing. Zoning plans, executed since 1960, have shaped the city as a concentric layout, where several zones may be distinguished: close center, downtown, suburbs and peripheral.

By analyzing the distribution of post-mining areas and former coal mines in the city of Zielona Góra, in relation to the findings of the planning documents shaping the directions of its development within the urban spatial policy, it must be assumed that the mentioned areas and the effects of their operation are not reflected in any planning document, or any other strategic document, affecting the way of planning the development and growth of Zielona Góra (fig. 2). Conditions arising from the functioning of the mines and the mining areas "United Mines of Zielona Góra" have not reflected also in the supporting documents, such as the ecophysiological studies and the estimation of an impact of planning documents on the environment, on the stage of the procedure planning, where, inter alia, in accordance with the will of the legislator the way the management of areas degraded by human activity is specified, including requiring remediation, which should also include land after extraction of coal [1].

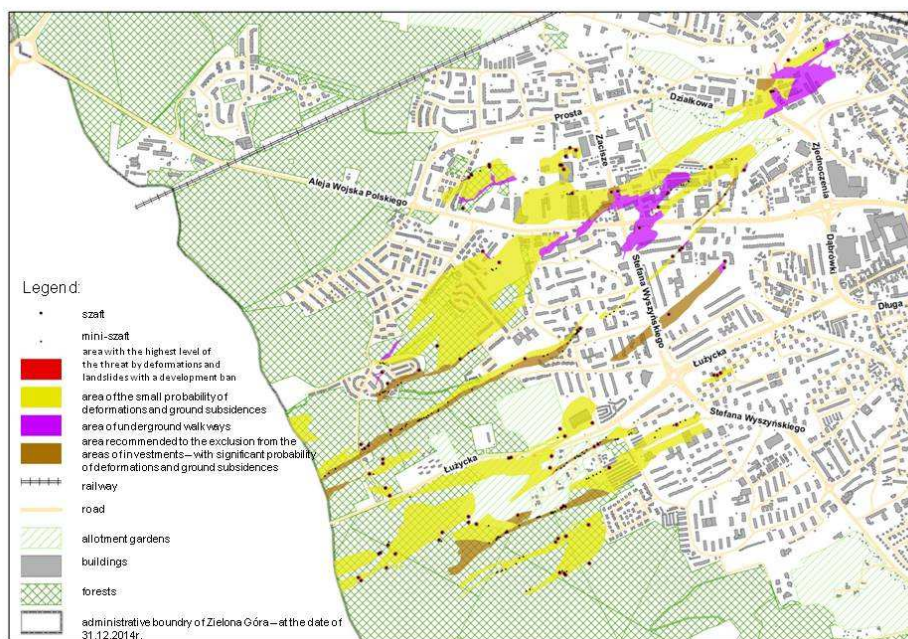


Fig. 2. Post-mining areas and former mine sites within the administrative boundaries of Zielona Góra. Source: Zielona Góra City Hall

Rys. 2. Tereny pogórnice i pokopalniana w granicach administracyjnych miasta Zielona Góra. Źródło: Urząd Miasta Zielona Góra

The planning documents of Zielona Góra do not suggest the fact that within the administrative boundaries of the city there were areas of extraction of lignite, neither in the conditions, nor the elements with the historical and cultural value that are possible to be set in space, and even more so in the arrangements for the city development directions. None of these documents also indicates these areas as potential areas of threat to new construction.

4. Soil remediation

The order of issuing administrative decisions - concession for extraction of minerals and the decision establishing the direction of remediation is defined by the provision of article 129 paragraph 2 of the Act of 9 June, 2011. Geological and Mining Law (Off. J. of 2016 item 1131) [17] provides that the land reclamation after mining activities, is done under the provisions of the Farm and Woodland Conservation Act of 3 February 1995 (Off. J. of 2015 item 909 as amended) [16]. In the current legal status, the County Governor, acting on the basis of art. 22 of the Farm and Woodland Conservation Act, may impose obligations concerning the rehabilitation of land, where mineral resources had been extracted, both on the active mining companies, which intend to close down the mining plant, in whole or in part, and also on the former, already closed companies.

In accordance with article 20 paragraph 4 of the act, a remediation of the land shall be run gradually as the land is becoming redundant - wholly, partly, or for a time limited to running industrial activities, and it shall end within 5 years after ceasing the activity. On the basis of the article 22 paragraph 1 of the mentioned act decisions on reclamation and land use shall specify:

- a) the degree of limitation or loss of value of land, as determined on the basis of the opinion;
- b) the person obliged to run the reclamation of land;
- c) the direction and the deadline of the reclamation;
- d) regarding the reclamation as finished.

Therefore, the obligation to reclamation and determining direction of reclamation, cannot be imposed before appearance of such an obligation because in accordance with article 5 subpar. 18 of the act - a remediation is understood as giving or restoring value in use or natural value of degraded land by appropriate shaping the terrain, improving its physical and chemical properties. This means that the concession for the exploitation of the deposits should appear first in the legal circulation, the decision determining the direction of remediation should be made later.

The remediation of the area of a former or illegal exploitation of minerals, in case of the property owner's change, in accordance with the formal and legal requirements, including the article 20 paragraph 1 of the Farm and Woodland Conservation Act of 3 February 1995 (Off. J. of 2015 item 909 as amended) [16], is an obligation, at the own expense, of the person causing the loss or limi-

tation of the land value in use. On this basis, the County Governor shall issue a decision ordering the execution of remediation. In accordance with article 20 paragraph 6 of the mentioned act, in case of a change of the person liable for the land remediation, by decision of the competent authority, referred to in art. 5, the rights and obligations arising from the previously released decisions are transferred. The provisions do not specify the extent to which the entity obliged to remediate controls the remediated land and what is his legal status in relation to the property when there is no contractual relationship concerning the property with its owner or autonomous possessor.

It therefore has to be concluded that in the current legislation, fulfilling the obligations in terms of a remediation, which are imposed by administrative decision, does not justify the assumption that the unit running the remediation becomes the owner of the land, within the meaning of article 2 paragraph 1 subparagraph 4 of the act of 12 January 1991 on taxes and fees. (Off. J. of 2014 item 849 as amended) [10] and the article 336 of the act of 23 April 1964 - Civil Code (Off. J. of 2016 item 380 as amended) [12].

The property owner is obliged to allow the person making the reclamation an access to the land and the execution of the obligations imposed due to the reclamation. After this period, a decision on completion of the remediation can be made. During this period the owner controls the property.

The degree of reduction or loss of land value in use, in the context of the heading remediation, is specified by the person preparing the appraisal (valuer), in accordance with article 28 paragraph 5 of the Farm and Woodland Conservation Act of 3 February 1995 (Off. J. of 2015 item 909 as amended.) [16], which indicates the need for reliance on two separate opinions of valuers. It should be assumed that a valuer may be any natural person, legal person or an organizational unit, which has the expertise in this area. It can also be a scientific institution. The selection of a valuer is made by the decision-making authority. The subject of the appraisals should be to determine the degree and extent of a reduction or loss of agricultural land's value in use.

5. Conclusions

The problem of the former mine sites of Zielona Góra, however, is that the lands were not marked and listed in the strategy documents of the city or neighboring municipalities. The problem of the land of former mine sites is not regulated, in this case, by the provisions resulting, inter alia, from the Act of 16 April 2004 on the protection of nature (Off. J. of 2015 item 1651 as amended) [11] and the Act of 24 April 2015 on amending certain laws due to the strengthening of the tools for landscape protection (Off. J. of 2015 items 774, 1688) [13], nor the Farm and Woodland Conservation Act of 3 February 1995 (Off. J. of 2015 909 as amended) [16], although their effects are regulated by article 86 of the Consti-

tution of the Republic of Poland [8] stating that the recovery of all elements of the natural environment is the constitutional responsibility [6].

The lack of regulation in this area is particularly important, since mining activities has unfortunately often been perceived negatively by the public, especially outside Silesia. Such an opinion is the effect of previous decades, when the issues of remediation and protection of the environment were not always given enough attention. Negligence from previous periods, however, are systematically being eliminated. However, the negative attitude of the society could be seen, for instance in preventing the possibility of setting up an open-pit lignite mine in Gubin (strategic resources of lignite for Lubuskie region), where the main problem of the public consultations concerning the establishment of lignite extraction zones in Gubin, was the lack of experience and knowledge of the superior institutions, carrying out the consultations on the process of inhabitants' participation. Activities have been virtually limited to talks about mine foundation, mining schedule, employment growth and personal assets liquidation, without the appraisal of their real values. The social and economic consequences of the establishment of a lignite mine also has not been properly assessed. Such an attitude resulted in a protest and objection of the inhabitants of Gubin municipality, against the mine establishment.

Currently, there are no regulations to ensure coherence of activities for post-mining land development with the objectives of the zoning plans and the requirements of the deposits protection. It seems that the presented legal loopholes and the lack of the promotion of activities towards remediation of post-mining areas are the basic obstacle to acceptance of changes to new mining areas by the public.

An independent aspect, resulting from the situation in the city of Zielona Góra, is the fact that the land were lignite used to be mined, in accordance with the law is not agricultural land. Legally, they are not recognized as post-mining areas and former mine sites, therefore, the regulations relating to the efforts to restore their environment and treating them as the land degraded by a human activity, also those which require remediation, are not a base for a policy of their development and destination.

References

- [1] Bazan-Krzywoszańska A.: *Rozwój społeczno-przestrzenny Zielonej Góry po 1945 roku: dynamika rozwoju od miasta małego do miasta średniej wielkości*, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2013.
- [2] Bazan-Krzywoszańska A., Greinert A., Skiba M.: *Stan prawny działań rekultywacyjnych w Polsce, [w:] Wydobycie węgla brunatnego i rekultywacja terenów pokopalnianych w regionie lubuskim*, red. A. Greinert, Zielona Góra, Instytut Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Zielonogórskiego, 2015, s. 275-287.

- [3] Gontaszewska A.: Kopalnia węgla brunatnego "Borussia" koło Ośna Lubuskiego, [w:] Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego. Inżynieria Środowiska. Nr 162 (42), 2016, s. 89-101.
- [4] Gontaszewska A.: Zarys historii górnictwa węgla brunatnego w okolicy Ośna Lubuskiego i Sulęcina (Ziemia Lubuska), *Hereditas Minariorum*, 2, 2015, 51-65, www.history-of-mining.pwr.wroc.pl (data dostępu: 10.11.2016).
- [5] Gontaszewska A., Kraiński A.: Złoże węgla brunatnego na terenie gminy Świdnica, Zielona Góra 2008, s. 47, http://journals.bg.agh.edu.pl/GORNICTWO/2011-03/GG_2011_3_09.pdf (data dostępu: 10.11.2016).
- [6] http://geoportal.pgi.gov.pl/geosam/ekspert_odpowiada/zloza_2013/rekultywacja (data dostępu: 10.11.2016).
- [7] Kasztelewicz Z., Sypniowski Sz.: Kierunki rekultywacji w Polskich kopalniach węgla brunatnego na wybranych przykładach, *Górnictwo i Geoinżynieria*, Rok 35, Zeszyt 3, 2011.
- [8] The Constitution of the Republic of Poland of 2 April 1997. Off. J. of 1997. no 78, item. 483 - as amended).
- [9] Nita J., Myga-Piątek U.: Krajobrazowe kierunki zagospodarowania terenów pogórnicznych, *Przegląd Geologiczny*, vol. 54, nr 3, 2006, https://www.pgi.gov.pl/images/stories/przeglad/pdf/pg_2006_03_25.pdf (data dostępu: 10.11.2016).
- [10] The act of 12 January 1991 on taxes and local fees. (Off. J. of 2014 item 849 as amended).
- [11] The act of 16 April 2004 on the protection of nature (Off. J. of 2015 item 1651 as amended).
- [12] The act of 23 April 1964. - Civil Code (Official Journal of 2016 item 380 as amended).
- [13] Act of 24 April 2015, amending certain laws in connection with the strengthening of the tools of landscape protection (Off. J. of 2015 r. item 774, 1688).
- [14] Act of 27 April 2001, the Environmental protection law (Off. J. of 2016, item 672 - as amended).
- [15] The act of 27 March 2003 on spatial planning and development (Off. J. of 2016. 778 - as amended).
- [16] Farm and Woodland Conservation Act of 3 February 1995 (Off. J. of 2015 item 909 as amended).
- [17] The Act of 9 June, 2011 Geological and Mining Law (Off. J. of 2016 item 1131).

POLITYKA ZAGOSPODAROWANIA TERENÓW POGÓRNICZYCH NA PRZYKŁADZIE MIASTA ZIELONA GÓRA

Streszczenie

Artykuł jest wprowadzeniem w problematykę kształtowania obszarów pogórnicznych i terenów pokopalnianych okolic miasta Zielona Góra (województwo lubuskie). Jednym z charakterystycznych procesów geologicznych, kształtujących obecną powierzchnię ww. obszaru były zaburzenia glacytektoniczne – zespół procesów związanych z działalnością lądolodów, które umożliwiły wyniesienie w pobliże powierzchni terenu pokładów węgla brunatnego. Pozwoliło to w przeszłości na ich częściową eksploatację. W XIX wieku, w okolicy Zielonej Góry, działało wiele

kopalni węgla brunatnego. Niektóre z nich zostały już zupełnie zapomniane i nie zachowały się po nich żadne dokumenty lub informacje stanowiące potwierdzenie faktu ich wcześniejszego istnienia. Obecnie najważniejszym surowcem naturalnym okolic miasta są kruszywa naturalne w postaci piasków i żwirów oraz różnego rodzaju surowce ceramiczne (iły, gliny).

Miasto Zielona Góra poszukując nowych terenów inwestycyjnych, zagospodarowuje kolejne obszary, w tym również te, które są terenami pokopalnianymi od co najmniej 70 lat. Nie przeprowadzono na nich rekultywacji, zgodnej z obecną procedurą przyjętą na mocy obowiązujących przepisów prawa. Chociaż rekultywacja terenów pogórnich, zarówno techniczna, jak i biologiczna, jest obowiązkiem zakładu górniczego i powinna być zgodna z przepisami prawa, to od ponad 70 lat nie istnieją instytucje objęte ww. obowiązkiem.

Wartość historyczna terenów pogórnich miasta, jak również problematyka związana z ochroną przyrody i krajobrazu, wynikająca między innymi z zapisów ustawy z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (Dz. U. z 2015 r. poz. 1651 – t.j. z późn. zm.) [11] oraz ustawy z dnia 24 kwietnia 2015 r. o zmianie niektórych ustaw w związku ze wzmocnieniem narzędzi ochrony krajobrazu (Dz. U. z 2015 r. poz. 774, 1688) [13], wskazują na potrzebę działań, mających na celu zachowanie funkcji dokumentacyjnej i podtrzymującej tożsamość miejsca. Dla takich przestrzeni można przewidzieć różnego rodzaju sportowo-rekreacyjne lub np. parkowe ich wykorzystanie [9]. Przede wszystkim jednak konieczne jest ustalenie kierunków rozwoju, w ramach dokumentów kształtujących miejską politykę przestrzenną, wskazującą na przeznaczenie i sposób zagospodarowania ww. terenów.

Słowa kluczowe: zagospodarowanie terenu, polityka miejska, dokumenty planistyczne, tereny pogórnice i pokopalniane

Przesłano do redakcji: 15.02.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Andżelika PIETRZYK¹
Dorota PAPCIAK²

WPŁYW TECHNOLOGII OCZYSZCZANIA WODY NA PROCES KSZTAŁTOWANIA BIOFILMU NA WYBRANYCH MATERIAŁACH INSTALACYJNYCH

W artykule oceniono wpływ technologii oczyszczania wody na proces formowania obrostów biologicznych na wybranych materiałach instalacyjnych (miedzi, stali ocynkowanej oraz polipropylenie). W pracy określona została podatność badanych powierzchni na powstawanie biofilmów. Wykorzystując techniki skaningowej mikroskopii elektronowej obserwowano zmiany zachodzące na powierzchniach materiałów instalacyjnych. Jakość wód pozostających w kontakcie z próbkami poddana została dodatkowo analizie mikrobiologicznej w celu oszacowania zmian liczebności drobnoustrojów w trakcie trwania eksperymentu. Wykonane zdjęcia SEM wykazały znaczne różnice w strukturze przestrzennej powstałych biofilmów w zależności od jakości wody oraz rodzaju badanego materiału instalacyjnego. Technologia oczyszczania wody miała wpływ na powstawanie i strukturę obrostu biologicznego. Stwierdzono, że materiałem szczególnie podatnym na adhezję mikroorganizmów jest stal ocynkowana. Powierzchnia tego materiału została całkowicie zdominowana przez komórki bakterii, a utworzony biofilm charakteryzował się złożoną strukturą przestrzenną. Miedź okazała się najbardziej odporna na kolonizację przez mikroorganizmy.

Słowa kluczowe: uzdatnianie wody, jakość wody, błona biologiczna, mikroskopia skaningowa

1. Wprowadzenie

W systemach dystrybucji wody przeznaczonej do spożycia ponad 95% mikroorganizmów występuje na wewnętrznych powierzchniach przewodów wodociągowych w postaci heterogenicznego biofilmu [1, 2]. Zdolność do tworzenia obrostów biologicznych mają zarówno mikroorganizmy autotroficzne jak rów-

¹ Andżelika Pietrzyk, Politechnika Rzeszowska, Zakład Oczyszczania i Ochrony Wód, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; d332@stud.prz.edu.pl

² Autor do korespondencji / corresponding author: Dorota Papciak, Politechnika Rzeszowska, Zakład Oczyszczania i Ochrony Wód, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; dpapciak@prz.edu.pl

niez heterotroficzne, w tym także bakterie chorobotwórcze [3]. Drobnoustroje tworzące błonę biologiczną charakteryzują się znaczną odpornością na działanie środków dezynfekcyjnych [4, 5]. Z uwagi na stan techniczny oraz warunki hydrauliczne panujące w instalacjach wodociągowych istnieje duże prawdopodobieństwo powstawania biofilmu, którego obecność stanowi zagrożenie sanitarne dla konsumentów wody, intensyfikuje korozję mikrobiologiczną oraz stwarza problemy eksploatacyjne [6-8].

Intensywność wzrostu biofilmu w systemie dystrybucji wody uzależniona jest od wielu czynników, wśród których należy wymienić m.in. jakość wprowadzanej do systemu wody (zawartość związków biogennych), ilość środka dezynfekcyjnego, temperaturę oraz warunki hydrodynamiczne panujące w instalacji [2, 9]. Rodzaj materiału, z którego wykonane są przewody wodociągowe również ma znaczący wpływ na szybkość tworzenia się obrostów biologicznych, ich strukturę oraz bioróżnorodność. Skład chemiczny materiału instalacyjnego, a także jego właściwości tj. chropowatość i podatność na korozję uznawane są za jedną z podstawowych przyczyn wzmożonej kolonizacji mikroorganizmów. Mnogość czynników warunkujących powstawanie i rozwój błony biologicznej sprawia, że zapobieganie temu zjawisku jest bardzo kłopotliwe [7, 10].

W ostatnich latach coraz częściej do budowy nowych przewodów wodociągowych wykorzystywane są materiały wykonane z tworzyw sztucznych tj. polietylenu, polichlorku winylu, polipropylenu oraz polibutylenu. Spodziewano się, że instalowane materiały syntetyczne, charakteryzujące się niewielką chropowatością, obniżą ryzyko wtórnego zanieczyszczenia mikrobiologicznego wody. Eksploatacja rurociągów z tworzyw sztucznych nie pozwoliła jednak na potwierdzenie tej tezy. Dotychczas przeprowadzone badania wskazują, że struktura powierzchni polimerów opóźnia początkowe etapy tworzenia biofilmu [11]. Błona biologiczna powstaje więc na wszystkich materiałach instalacyjnych, lecz każdy z nich stwarza odmienne warunki do rozwoju drobnoustrojów [12].

Obrosty biologiczne stanowią niewątpliwie poważne zagrożenie dla zdrowia ludzi, w związku z tym poszukuje się skutecznych metod pozwalających zapobiegać temu zjawisku [13]. Woda dostarczana odbiorcom musi charakteryzować się odpowiednią jakością nie tylko w momencie wprowadzenia do sieci wodociągowej ale również w punkcie odbioru przez konsumentów. Zwiększenie efektywności oczyszczania wody, a w szczególności eliminacja substancji biogennych może przyczynić się do ograniczenia wtórnego rozwoju mikroorganizmów w instalacjach wodociągowych [14]. Brakuje jednak jednoznacznych i wystarczających informacji na temat wpływu sposobu uzdatniania wody na szybkość wzrostu biofilmu na wewnętrznych powierzchniach przewodów.

Celem badań było określenie wpływu technologii oczyszczania wody na proces formowania biofilmu na wybranych materiałach powszechnie stosowanych w instalacjach wodociągowych. W pracy oceniono również podatność materiałów technicznych na powstawanie obrostów biologicznych.

2. Materiały i metodyka badań

Badania przeprowadzono w skali laboratoryjnej z zastosowaniem testów naczyniowych. Próbkki badanych materiałów tj.: stal ocynkowaną, miedź oraz polipropylen umieszczono na okres 90 dni w szklanych naczyniach wypełnionych dwoma rodzajami wody wodociągowej tj.: (I) naturalną wodą podziemną uzdatnioną według technologii opartej o koagulację i filtrację na złożach piaskowych oraz (II) uzdatnioną według technologii jw. poszerzoną o proces biofiltracji II stopnia na granulowanym węglu aktywnym typu WD-Extra [Tab. 1]. Hodowlę prowadzono w warunkach statycznych w temperaturze pokojowej (17°C), bez dostępu światła.

Tabela 1. Parametry fizyczno-chemiczne i mikrobiologiczne analizowanych wód

Table 1. Physicochemical and microbiological parameters analyzed waters

Parametry	Jednostka	WODA I	WODA II
Tlen rozpuszczony	mg O ₂ /l	8,71	6,6
OWO	mg/l	9,15	6,58
Absorbancja	245nm	18,62	12,12
Utlenialność	mg O ₂ /l	4,2	2,4
Fosforany	mg PO ₄ ³⁻ /l	0,002	0,001
Jon amonowy	mg N-NH ₄ ⁺ /l	0,1	0,1
Azot azotynowy	mg N-NO ₂ /l	0,0015	0
Azot azotanowy	mg N-NO ₃ /l	0,912	0,912
Przewodnictwo	μs/cm	882	823
pH	-	7,81	8,01
Barwa	mg Pt/l	13	4
Mętność	NTU	0,50	0,24
Bakterie mezofilne	jtk/1ml	1	0
Bakterie psychrofilne	jtk/1ml	17	8

Wpływ sposobu oczyszczania wody na proces kształtowania biofilmu oceniano na podstawie zdjęć SEM wykonanych za pomocą mikroskopu skaningowego typu Joel SEM 5500-LV. Próbkę kontrolną stanowiły niedezynfekowane materiały instalacyjne przepłukane wodą destylowaną. W czasie trwania eksperymentu prowadzono również monitoring kontrolny w zakresie analizy bakteriologicznej, wody pozostającej w kontakcie z materiałem badawczym, w 1, 40, 50 i 65 dobie. Próbkę odniesienia stanowiła woda o parametrach fizyczno-chemicznych zawartych w tabeli 1. Wodę poddawano analizie na obecność bakterii mezofilnych (48 godzinna inkubacja w temp. 37°C) oraz psychrofilnych (72 godzinna inkubacja w temp. 22°C) z wykorzystaniem metody płytkowej Kocha na agarze referencyjnym oraz za pomocą cytometrii przepływowej z zastosowaniem barwników fluorescencyjnych: SYBR Green i jodku propidyny. Pierwszy z wymienionych barwników umożliwił określenie w próbkach wody liczebności zarów-

no żywych jak i martwych bakterii, z kolei drugi tylko obumarłych mikroorganizmów. Do analizy wykorzystano cytometr przepływowy typu *CyFlow Cube 8*.

Badane wody w dniu rozpoczęcia badań spełniały wymagania aktualnego Rozporządzenia Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi [Dz. U. 2015, poz. 1989].

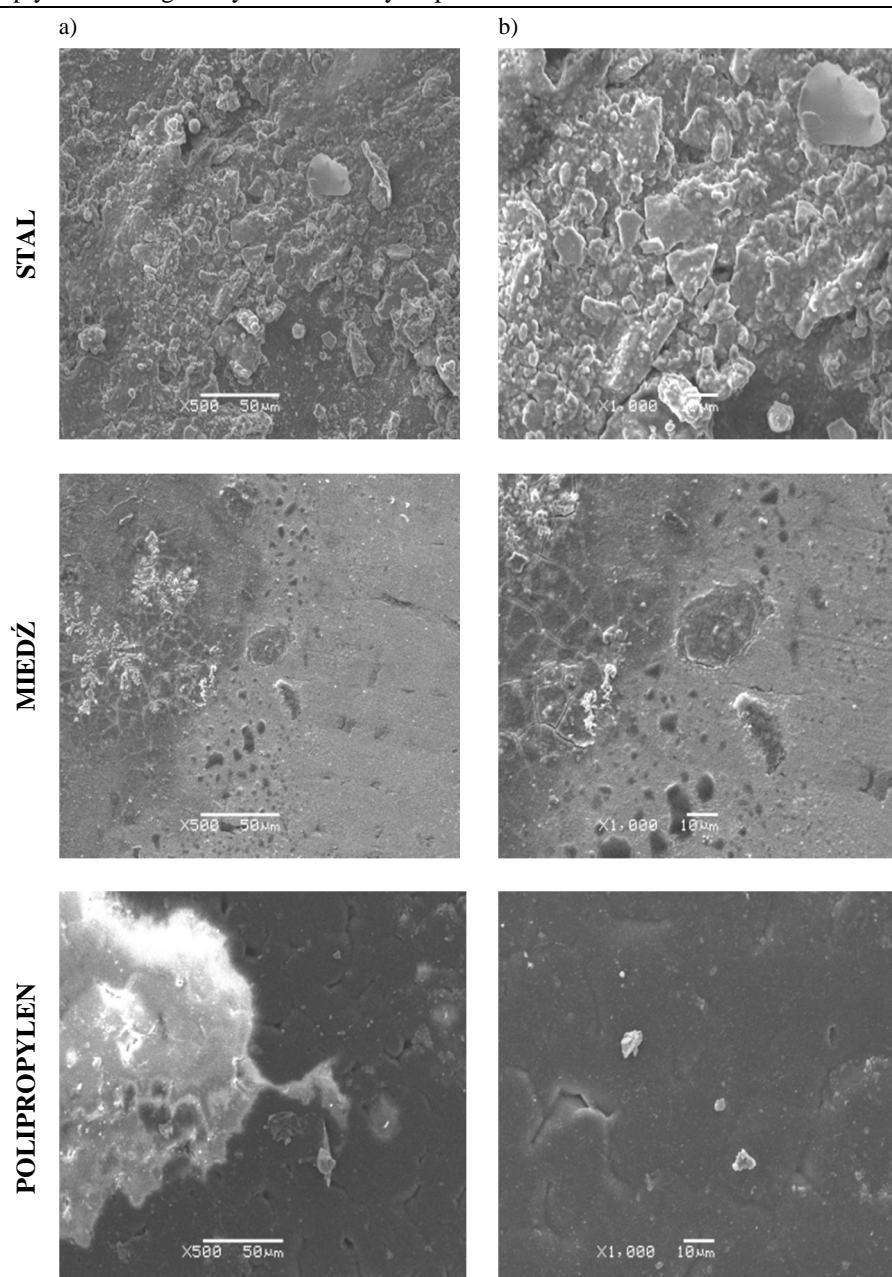
3. Analiza mikroskopowa struktury powierzchni materiałów

Wykorzystane do badań materiały różniły się między sobą nie tylko technologią wytwarzania ale również składem, budową oraz szorstkością powierzchni. Na podstawie zdjęć SEM wykonanych dla próbek kontrolnych stwierdzono, że największą nierówność powierzchni spośród badanych materiałów charakteryzowała się stal ocynkowana. Materiał posiadał nieregularną strukturę z dużą ilością nakładających się na siebie grudek o zróżnicowanej wielkości, co mogło sprzyjać łatwiejszemu forowaniu biofilmu [rys. 1].

Najbardziej gładką strukturą charakteryzował się polipropylen (PP), na powierzchni tego tworzywa występowały nieliczne zagłębienia [rys. 1]. Źródła literaturowe [5] podają, że materiały polimerowe ze względu na swoje właściwości hydrofobowe mogą opóźniać początkowe fazy tworzenia biofilmu (tzn. adhezję mikroorganizmów), lecz kolejne etapy mogą przebiegać szybciej niż w przypadku przewodów wykonanych z innych materiałów. Podobne zależności zaobserwowano dla materiałów miedzianych, które również mogą spowalniać procesy powstawania obrostów biologicznych wskutek toksycznego oddziaływania jonów miedzi. Jednak gdy mikroorganizmy przystosują się do otaczających warunków, wówczas następuje nieunikniony proces kolonizacji [5].

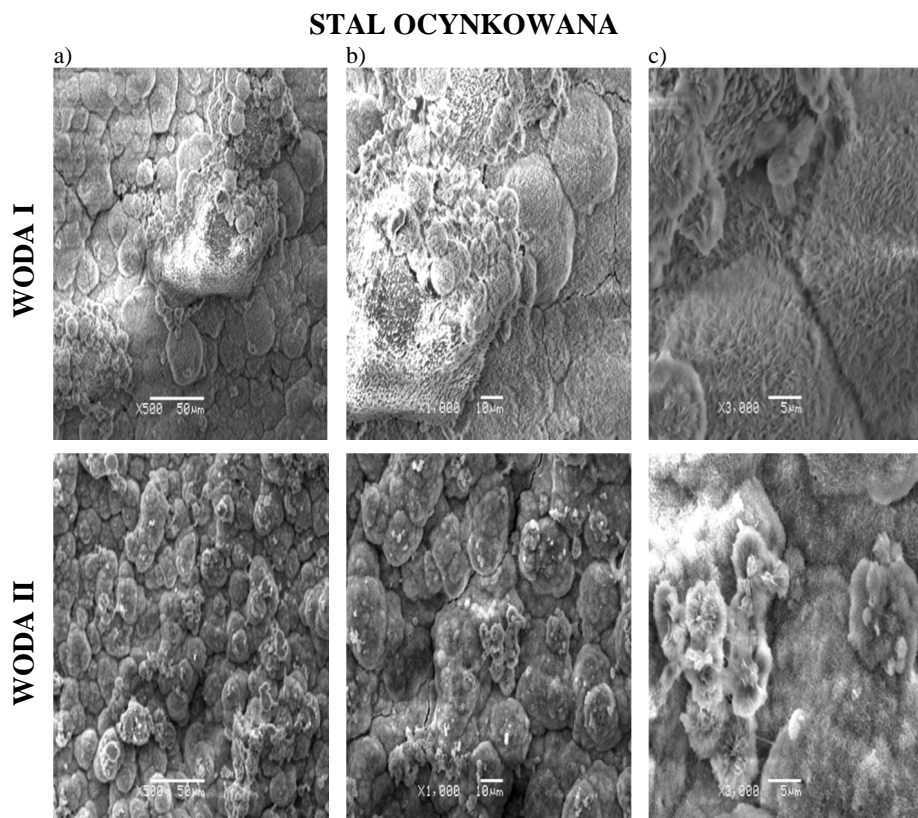
Obserwacja powierzchni próbki miedzi wykazała liczne przebarwienia, a przy większych powiększeniach także mikropęknięcia, które najprawdopodobniej były wynikiem uszkodzenia próbki podczas jej przygotowywania do badań [rys. 1]. Wady materiałowe w postaci mikroszczelin oraz wgłębień stanowią najbardziej atrakcyjne miejsca dla rozwoju mikroorganizmów, gdyż zapewniają one dodatkową ochronę (w warunkach rzeczywistych zabezpieczają bakterie przed wypłukiwaniem przy dużych zmianach natężenia przepływu).

Obserwacja powierzchni materiałów po 90 dniowym kontakcie z analizowanymi wodami [rys. 2] wykazała różnice w budowie powstałej błony biologicznej. Stwierdzono, że najbardziej sprzyjające warunki do namnażania się mikroorganizmów wystąpiły na powierzchni stali ocynkowanej. W tym przypadku, niezależnie od technologii oczyszczania wody, badana próbka została całkowicie pokryta biofilmem o złożonej strukturze. Dla wody I utworzona struktura przyjmowała bardziej płaską i zwartą formę, z kolei dla wody II można zaobserwować liczne nakładające się na siebie gąbczaste wypukłości. Rodzaj zastosowanej wody miał wpływ na strukturę przestrzenną powstałego obrostu biologicznego [rys. 2].



Rys. 1. Struktura analizowanych materiałów tj. stal nierdzewna, miedź, polipropylen - próba kontrolna (powiększenia: a - 500x, b - 1000x)

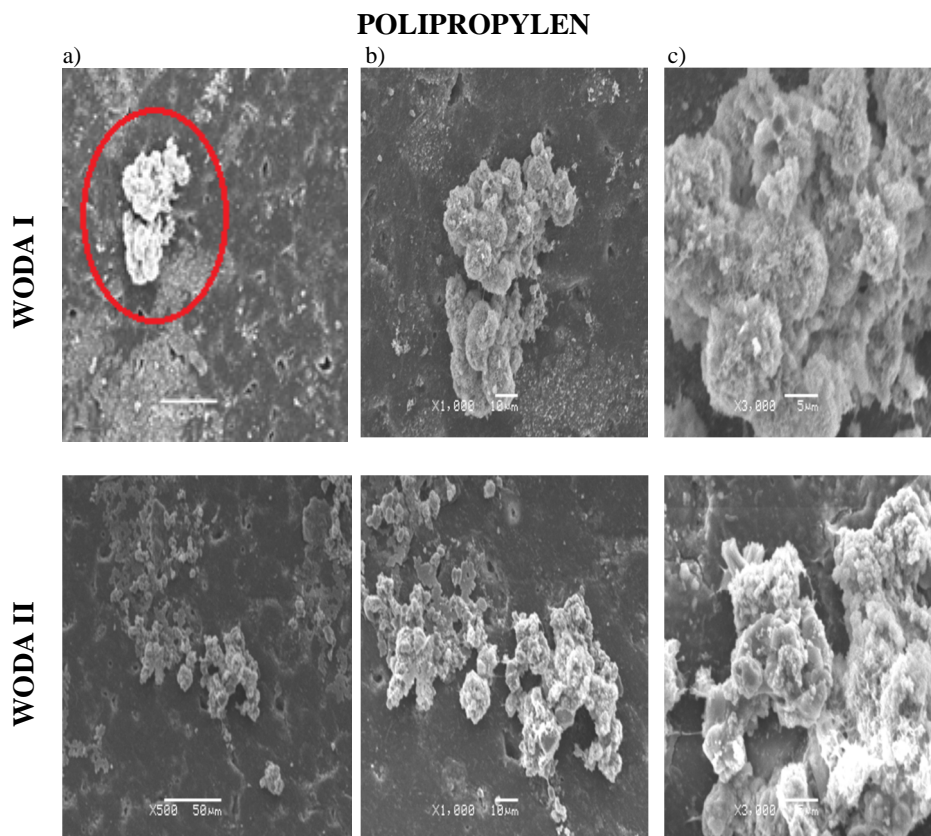
Fig. 1. The structure of the materials analyzed, i.e. stainless steel, copper, polypropylene - control test (magnification: a - 500x, b - 1000x)



Rys. 2. Struktura błony biologicznej powstałej na stali po 3 miesięcznym kontakcie z wodą I i II (powiększenia: a - 500x, b - 1000x, c - 3000x)

Fig. 2. Structure of the biofilm formed on steel after a 3 - month contact with water I and II (magnification: a - 500x , b - 1000x, c - 3000x)

Na fragmencie polipropylenu, po 3 miesięcznym kontakcie z wodą I, zaobserwowano utworzenie kolonii mikroorganizmów [rys. 3], której rozmiary wynosiły około 70 µm długości oraz 50 µm szerokości. Pozostała część próbki również pokryta była błoną biologiczną w postaci drobnych mikrokolonii, których rozmiary mieściły się w zakresie od około 1 do 7 µm. Na próbce polipropylenu, która zanurzona została w wodzie poddanej procesowi biofiltracji – woda II, wykształcony obrost biologiczny przyjął bardziej rozproszoną formę. Kolonie bakterii pokrywały duży fragment badanego materiału, a powstała struktura miała charakter gąbczasty [rys. 3].

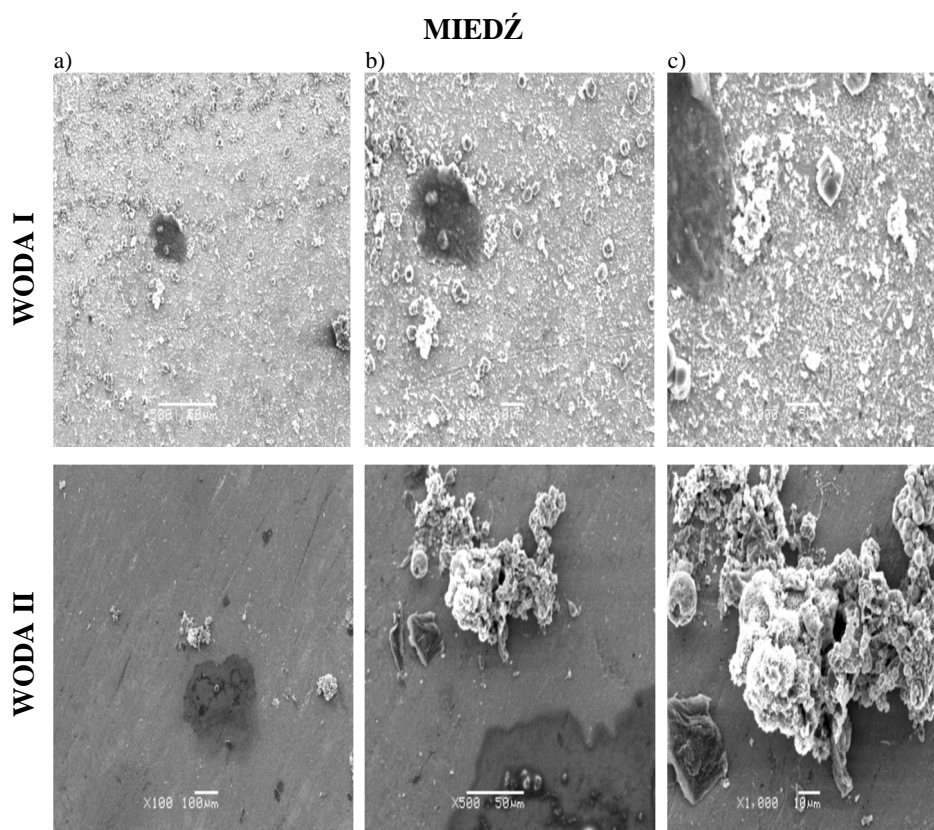


Rys. 3. Struktura błony biologicznej powstałej na polipropylenie po 3 miesięcznym kontakcie z wodą I i II (powiększenia: a - 500x, b - 1000x, c - 3000x)

Fig. 3. Structure of the biological membrane of the resulting polypropylene after 3 month in contact with water, I and II (magnification: a - 500x, b - 1000x, c - 3000x)

W przypadku miedzi w wyniku kontaktu z wodą I, próbka materiału została całkowicie skolonizowana przez drobnoustroje, a wielkość powstałych mikrokolonii zawierała się w przedziale od 2 do 6 μm . Z kolei powierzchnia materiału mającego kontakt z wodą II zachowała swoją pierwotną fakturę i nie została zmieniona na skutek aktywności mikroorganizmów. Na analizowanej powierzchni zaobserwowano nieliczne skupiska drobnoustrojów, z czego rozmiary największej formacji kształtowały się na poziomie około 60 μm długości i 100 μm szerokości. Pozostałe mikrokolonie osiągały mniejsze rozmiary wynoszące od 6 do 35 μm [rys. 4]. Na próbce kontrolnej stwierdzono obecność zagłębień i pęknięć, które mogły przyczynić się do wzmożonej miejscowej adhezji mikroorganizmów.

Zaobserwowane różnice kolonizacji próbek miedzi [rys. 4] mogły wynikać z odmiennego składu chemicznego wód. W wyniku zastosowania procesu biofiltracji nastąpiło obniżenie zawartości wskaźników zanieczyszczenia wody tj. ogóln-



Rys. 4. Struktura błony biologicznej powstałej na miedzi po 3 miesięcznym kontakcie z wodą I i II (powiększenia: a - 500x, b - 1000x, c - 3000x)

Fig. 4. Structure of the biofilm formed on the copper after 3 -month contact with water I i II (magnification: a - 500x , b - 1000x, c - 3000x)

nego węgla organicznego (o 28%), utlenialności (o 43%), absorpcji w nadfiolecie (o 35%), barwy (o 70%) oraz mętności (o 57%). Filtracja II stopnia na węglu aktywnym jest procesem odgrywającym znaczącą rolę w modyfikacji składu oczyszczanej wody, w wyniku którego następuje obniżenie zawartości związków organicznych. Pod względem mikrobiologicznym obie wody w dniu rozpoczęcia badań, charakteryzowały się porównywalną jakością tzn. liczebność występujących organizmów mezofilnych i psychrofilnych nie przekraczała wartości dopuszczalnej dla wody przeznaczonej do spożycia [Tab. 1].

Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu stwierdzono, że wszystkie badane materiały instalacyjne są podatne na powstawanie i rozwój biofilmu. Należy zaznaczyć, że warunki rozwoju błony biologicznej w przeprowadzonym eksperymencie różniły się od warunków rzeczywistych panujących w instalacjach wodociągowych.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają obserwacje przeprowadzone w innych ośrodkach naukowych. Zarówno Yu [15] jak i Lehtola [6] stwierdzili, że najmniejsza ilość drobnoustrojów została zaobserwowana na materiałach miedzianych, natomiast znacznie większe ilości kolonii stwierdzano w rurociągach wykonanych ze stali nierdzewnej oraz tworzyw sztucznych. Badania nad innymi materiałami instalacyjnymi (tj. polichlorek winylu, polietylen, szkło i cement) również wskazują, że szybkość powstawania biofilmu jest zależna od zastosowanego materiału [16]. Z kolei badania przeprowadzone przez Traczewską i innych [10] potwierdzają, że stosowane w systemach dystrybucji materiały polimerowe nie eliminują zjawiska powstawania biofilmu.

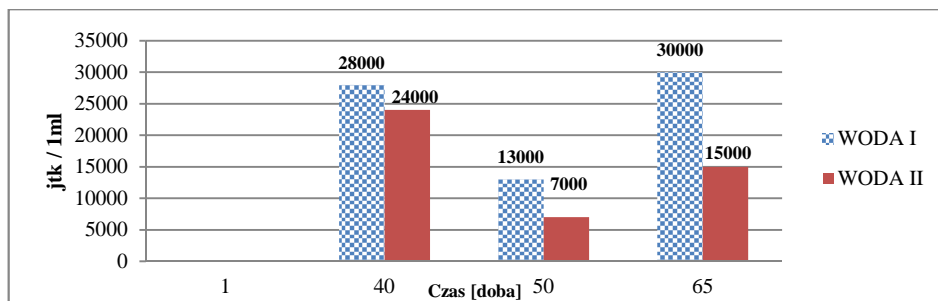
Różnorodność czynników warunkujących powstawanie błony biologicznej sprawia, że poznanie jej struktur oraz mechanizmu funkcjonowania jest niezbędne do opracowania skutecznych metod zapobiegania temu zjawisku. Obrost biologiczny utworzony w instalacjach dystrybucji wody stanowi zagrożenie sanitarne dla konsumentów, intensyfikując korozję mikrobiologiczną, a także może być przyczyną strat hydraulicznych spowodowanych zwiększeniem szorstkości przewodów wodociągowych [3].

4. Analiza mikrobiologiczna wody

Substancjami pokarmowymi warunkującymi rozwój mikroorganizmów są nieorganiczne związki azotu i fosforu, z kolei bakterie heterotroficzne wymagają dodatkowo obecności biodegradowalnego rozpuszczonego węgla organicznego. Do sieci wodociągowej powinna być wprowadzana wyłącznie woda stabilna biologicznie, dlatego też skuteczna eliminacja substratów biogennych jest kluczowym zadaniem stacji oczyszczania wody [14]. Na podstawie analizy fizykochemicznej i mikrobiologicznej stwierdzono, że woda I zawierająca większe ilości organicznych substancji pokarmowych stanowi środowisko bardziej sprzyjające rozwojowi mikroorganizmów.

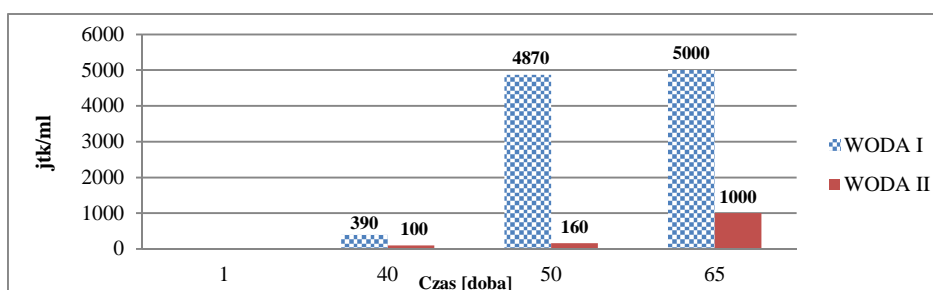
Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że udział bakterii mezofilnych był mniejszy w porównaniu do udziału bakterii psychrofilnych, których maksymalna liczba osiągnęła wartość $300 \cdot 10^2$ jtk/ml dla wody I (doba 65) oraz $240 \cdot 10^2$ jtk/ml dla wody II (doba 40) [rys. 5]. Porównując jakość mikrobiologiczną badanych wód stwierdzono, że w trakcie prowadzonego monitoringu woda I charakteryzowała się większą liczbą obecnych drobnoustrojów. Szczególną różnicę można zaobserwować w przypadku bakterii mezofilnych, których liczebność w 50 dobie była trzydziestokrotnie wyższa w wodzie I niż w wodzie II poddanej procesowi biofiltracji [rys. 6]. W trakcie trwania eksperymentu w obu badanych roztworach zaobserwowano wzrost ilości bakterii mezofilnych, które mogły być wprowadzone do wody na próbkach materiałów instalacyjnych.

Uzyskane wyniki badań mogą wskazywać, że zastosowanie filtracji II stopnia w technologii oczyszczania wody może ograniczyć rozwój mikroorganizmów w wyniku mniejszej zawartości substancji odżywczych.



Rys. 5. Zmiana liczebności mikroorganizmów psychrofilnych w badanych wodach

Fig. 5. Change the number of psychrophilic microorganisms in the analyzed waters



Rys. 6. Zmiana liczebności mikroorganizmów mezofilnych w badanych wodach

Fig. 6. Change the number of mesophilic microorganisms in the analyzed waters

Liczba mikroorganizmów została oznaczona również metodą cytometrii przepływowej, w której wykorzystano barwniki fluorescencyjne tj.: SYBR Green oraz jodek propidyny. Wyniki badań uzyskane za pomocą tej metody osiągnęły znacznie wyższe wartości niż w przypadku tradycyjnej metody hodowlanej. Przyczyną tak dużej liczebności mikroorganizmów jest fakt, iż stosowany w doświadczeniu barwnik fluorescencyjny podłącza się do DNA wszystkich komórek (żywych i martwych). Pomiar dokonany w 1 i 40 dobie wskazywał porównywalną liczbę mikroorganizmów w analizowanych wodach, lecz od 50 doby w wodzie I zaobserwowano gwałtowny przyrost liczby bakterii [tab. 2]. W 50 dobie różnica w liczebności drobnoustrojów wynosiła 56% [rys. 5] i mogła być spowodowana obecnością biodegradowalnego węgla organicznego w wodzie I.

5. Wnioski

1. Biofilm powstaje na wszystkich badanych materiałach instalacyjnych tj. stali ocynkowanej, miedzi oraz polipropylenie.
2. Struktura fizyczna powierzchni badanych materiałów miała wpływ na proces powstawania oraz strukturę przestrzenną biofilmów.

Tabela 2. Jakość bakteriologiczna wody oznaczana metodą cytometrii przepływowej

Table 2. Bacteriological quality of water surveyed identified by flow cytometry

Czas pomiaru [doba]	Badane wody	Liczba żywych mikroorganizmów	Liczba obumarłych mikroorganizmów	Ogólna liczba mikroorganizmów
		[jtk/ml]		
1	I	22 523	9 539	32 068
	II	23 488	17 057	40 545
40	I	249 624	179 031	428 655
	II	370 606	70 768	441 374
50	I	317 798	293 798	611 596
	II	234 695	33 510	268 205
65	I	547 414	217 863	765 277
	II	385 056	129 442	514 498

3. Stwierdzono, że materiałem szczególnie podatnym na adhezję mikroorganizmów jest stal ocynkowana. Powierzchnia tego materiału została całkowicie zdominowana przez komórki bakterii, a utworzony biofilm charakteryzował się złożoną strukturą przestrzenną. Miedź okazała się najbardziej odporna na kolonizację przez mikroorganizmy.
4. Technologia oczyszczania ma wpływ na jakość bakteriologiczną wody. Zarówno metoda cytometrii przepływowej, jak i metody hodowlane potwierdzają lepszą jakość bakteriologiczną wody oczyszczanej z zastosowaniem procesu biofiltracji. Stwierdzono 30-krotnie mniejszą liczbę bakterii mezofilnych w wodzie oczyszczonej z wykorzystaniem biofiltracji.

Literatura

- [1] Biedroń I., Trusz-Zdybek A., Traczewska T., Piekarska K.: Zastosowanie pomiaru impedancji do oceny rozwoju biofilmu w systemach wodociągowych, Instal, nr 5, s. 37-42, 2013.
- [2] Łebkowska M., Pajor E., Rutkowska-Narożniak A., Kwietniewski M., Wąsowski J., Kowalski D.: Badania nad rozwojem mikroorganizmów w przewodach wodociągowych z żeliwa sferoidalnego z wykładziną cementową, Ochrona Środowiska, vol. 33, nr 3, s. 9-13, 2011.
- [3] Kołwzan B.: Analiza zjawiska biofilmu – warunki jego powstawania i funkcjonowanie, Ochrona Środowiska, vol. 33, nr 4, s. 3-14, 2011.
- [4] Lethola M.J., Miettinen I.T., Lampola T., Hirvonen A., Vartiainen T., Martikainen P.J.: Pipeline materials modify the effectiveness of disinfectants in drinking water distribution systems, Water Research 39, s. 1962-1971, 2005.
- [5] Toczyłowska B.: Rola biofilmu w zapobieganiu i zwalczaniu bakterii Legionella w instalacjach wodociągowych, Technologia Wody, nr 1(45), s. 22-30, 2016.
- [6] Lehtola M.J., Miettinen I.T., Keinänen M.M., Kekkia T.K., Laine O., Hirvonen A., Vartiainen T., Martikainen P.J.: Microbiology, chemistry and biofilm development in

- a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes, *Water Research* 38, s. 3769-3779, 2004.
- [7] Świdarska-Bróż M.: Skutki obecności biofilmu w systemach dystrybucji wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, *Ochrona Środowiska*, nr 1, vol. 34, s. 9-14, 2012.
- [8] Traczewska T.M., Sitarska M.: Materiały syntetyczne podłożem dla rozwoju biofilmu w systemach dystrybucji wody, *Ekotoksykologia w ochronie środowiska: praca zbiorowa. Materiały syntetyczne podłożem dla rozwoju biofilmu w systemach dystrybucji wody*, s. 443-450.
- [9] Świdarska-Bróż M., Wolska M.: Główne przyczyny wtórnego zanieczyszczenia wody w systemie dystrybucji, *Ochrona Środowiska*, nr 4, s. 29-34, 2006.
- [10] Traczewska T.M., Sitarska M., Biedroń I.: Ekologiczne i techniczne aspekty powstawania biofilmu w wodzie, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2014.
- [11] Traczewska T.M., Sitarska M.: Wpływ struktury fizycznej podłoża na rozwój błony biologicznej, *Ochrona przed korozją*, vol. 55, nr 1, s. 15-19, 2012.
- [12] Bąk J., Dąbrowski W.: Wpływ materiałów kontaktujących się z wodą wodociagową na rozwój mikroorganizmów w systemie zaopatrzenia w wodę, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 10, s. 411-412, 2012.
- [13] Szczotko M., Krogulska B., Krogulski A., Kurzątkowski W., Staniszevska M.: Porównanie struktury i tempa wzrostu biofilmów powstających na powierzchni materiałów budowlanych kontaktujących się z wodą przeznaczona do spożycia, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 11, s. 498-502, 2012.
- [14] Wolska M.: Usuwanie substancji biogenych w technologii oczyszczania wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2015.
- [15] Yu J., Kim D., Lee T: Microbial diversity in biofilms on water distribution pipes of different materials, *Water Science and Technology*, Vol. 61, s. 163-171, 2010.
- [16] Hallam N.B., West J.R., Forster C.F., Simms J.: The potential for biofilm growth in water distribution systems, *Water Research* 35, no. 17, s. 4063-4071, 2001.

THE INFLUENCE OF WATER TREATMENT TECHNOLOGY ON THE PROCESS OF BIOFILM FORMATION ON THE SELECTED INSTALLATION MATERIALS

S u m m a r y

The influence of water treatment technology on the process of biofilm formation on the selected plumbing materials (copper, galvanized steel and polypropylene) was assessed in this paper. The sensitivity of the investigated surfaces to biofilm formation was determined in the paper. Using the scanning electron microscope technique, changes occurring on the surfaces of the installation materials have been observed. The quality of the water in contact with the samples was subjected to microbiological analysis in order to estimate changes in the abundance of microorganisms during the experiment. The SEM photos showed significant differences in the spatial structure of the biofilms depending on the quality of the water and the type of test material. Water treatment technology has influenced the formation and structure of biological growth. It has been found that the

material particularly susceptible to the adhesion of microorganisms is galvanized steel. The surface of this material was completely dominated by bacterial cells, and the biofilm formed was characterized by a complex spatial structure. Copper has proven to be the most resistant to colonization by microorganisms.

Keywords: water treatment, water quality, biological membrane, scanning microscopy

Przesłano do redakcji: 18.06.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Klara KANTOROWICZ¹

ARCHITEKTURA KOLEGIÓW JEZUICKICH WE WŁOSZECH I W RZECZYPOSPOLITEJ DO POŁOWY XVII WIEKU – POSZUKIWANIE WZORÓW NA WYBRANYCH PRZYKŁADACH

Kiedy w końcu XVI wieku Jezuici rozpoczęli swoją działalność na terenie Rzeczypospolitej tym samym zaczął się proces budowy domów zakonnych Towarzystwa Jezusowego. Samodzielnymi jednostkami organizacyjnymi były fundowane przy wsparciu biskupów i magnatów kolegia, przy których jezuita prowadzili działalność edukacyjną. Architektami pierwszych kolegiów na terenie Rzeczypospolitej byli sprowadzani z Włoch architekci-jezuita. Przenosili oni na grunt Polski włoskie rozwiązania, ale (zgodnie z założeniem akomodacji do miejscowych warunków i potrzeb) dostosowywali owe wzorce tak aby lepiej funkcjonowały w odmiennym otoczeniu. Mimo iż wyraźnie widoczne są podobieństwa, zwłaszcza w ogólnym rozplanowaniu elementów zespołu, w polskich transpozycjach wypracowanych we Włoszech wzorców wyrażone są cechy specyficzne dla tego obszaru.

Porównanie rozwiązań architektonicznych i funkcjonalnych kolegiów Polskich i Włoskich pozwala na określenie jak silny był wpływ lokalnych warunków na ugruntowane wzorce. Odmiennie warunki klimatyczne zaowocowały odseparowaniem komunikacji od dziedzińców, a także innym sposobem funkcjonowania tychże. Natomiast uboższe sąsiedztwo kolegiów (zwłaszcza w mniejszych miastach) doprowadziło do znacznej redukcji w dekoracyjnym opracowaniu elewacji. Należy jednak pamiętać że jednym z najsilniejszych elementów kształtujących układ funkcjonalny danego zespołu była konieczność dopasowania się do konkretnej, niepowtarzalnej sytuacji: kształtu działki oraz ukształtowania otaczającej tkanki miejskiej poprzez wykorzystanie istniejących osi i połączeń widokowych. Czyni to każdy obiekt niepowtarzalnym i najlepiej ukazuje filozofię działania zakonu jezuitów.

Słowa kluczowe: Towarzystwo Jezusowe, architekci jezuita, styl jezuita, szkoły jezuita

1. Wprowadzenie

Historycy sztuki XIX wieku (szczególnie w Niemczech) wprowadzili pojęcie tzw. stylu jezuita (*Jesuitenstil*), określając tym mianem nazbyt dekora-

¹ Klara Kantorowicz, Politechnika Warszawska, Wydział Architektury, ul. Koszykowa 55, 00-659 Warszawa; klarakantorowicz@yahoo.com

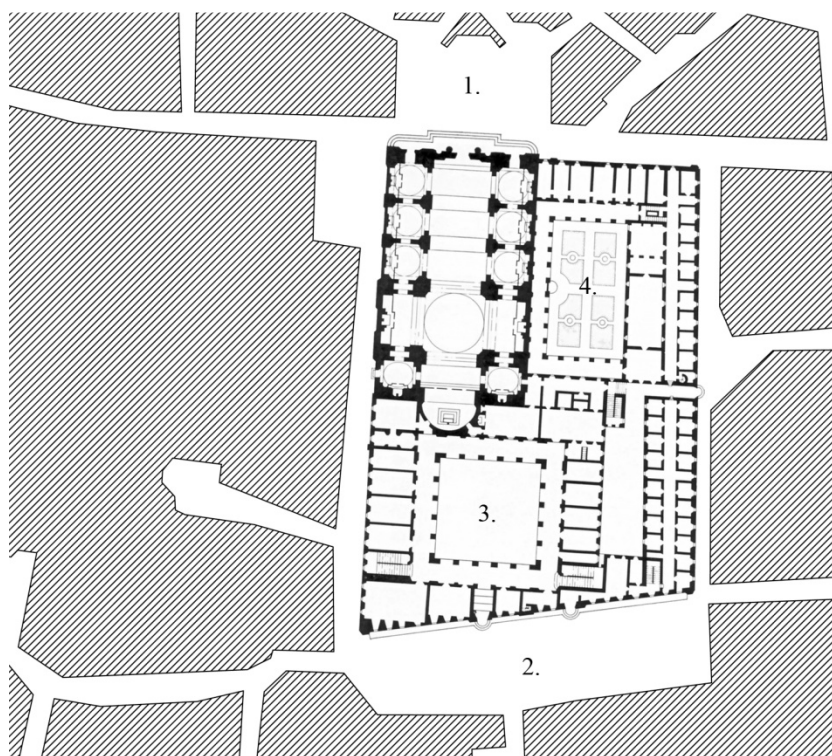
cyjny nurt baroku, często graniczący ze złym smakiem [1]. Jednak już od początków XX wieku wielu autorów (między innymi: Francois de Dainville [2], Yvan Christ [3], Pietro Pirri [4], Pierre Moisy [5], Jean Vallery-Radot [6], Richard Bösel [7], Mario Bencivenni [8], Jerzy Paszenda [9], Gauvin Alexander Bailey [10], Evonne Levy [11]) sprzeciwiało się tej koncepcji wskazując na silne zróżnicowanie rozwiązań architektonicznych i stylistycznych na obszarze różnych prowincji jezuickich.

Jezuici sami określali budownictwo wznoszone na potrzeby zakonu jako kształtowane według *modus noster* - "naszego sposobu". W pewnej mierze usprawiedliwia to błąd XIX-wiecznych badaczy, którzy ukuli sformułowanie: *styl jezuicki*. Określenie to jednak, patrząc na odmienne rozwiązania stylistyczne zastosowane przez architektów jezuickich w różnych regionach, należy odnieść bardziej do aspektów technicznych, praktycznych i funkcjonalnych budynków wznoszonych na potrzeby Towarzystwa Jezusowego. *Modus noster* dotyczył zatem bardziej sposobu działania niż kanonu rozwiązań stylistycznych [12], gdyż podstawową zasadą działania zakonu było dostosowanie się do miejscowych warunków, potrzeb i przyzwyczajzeń [13]. Ów sposób działania dotyczył jednak nie tylko samego procesu inwestycyjnego i budowlanego ale również sposobu funkcjonowania samych obiektów, czyli ich wewnętrznych układów funkcjonalnych. Mimo próśb prowincjałów nie zostały, ze względu na różnorodność uwarunkowań, wprowadzone do powszechnego użytku wzorcowe rozwiązania [14]. Jedynie podczas pierwszej Kongregacji Generalnej zapisano podstawowe zasady budowy domów zakonnych i kolegiów: aby były solidne, praktyczne i zdrowe, a równocześnie na tyle skromne żeby nie wyglądały jak pałace [15]. Został wprowadzony także obowiązek akceptacji wszystkich projektów przez urząd centralny, ale podstawową cechą podlegającą ocenie projektów architektonicznych podczas zatwierdzania była odpowiednia dyspozycja funkcjonalna wewnątrz.

Z tego względu należy zastanowić się czy nie można wskazać charakterystycznego rysu architektury jezuickiej na określonym, stosunkowo homogenicznym obszarze. Czy istnieje np. polski styl jezuicki? W jakim stopniu takie lokalne nurty jezuickiej architektury powielają wzorce włoskie (a w szczególności rzymskie), które siłą rzeczy stanowiły punkt odniesienia zarówno dla architektów jak i dla *consiliarius aedificiorum* - ciała doradczego przy Generale do spraw architektury? Jakie elementy dzieła architektonicznego podlegały najsilniejszym wpływom uwarunkowań lokalnych?

2. Charakterystyczne rozwiązania architektoniczne kolegiów jezuickich we Włoszech

Architektura jezuicka narodziła się we Włoszech (prowincja włoska ustanowiona została już w 1552 roku). Tutaj w osobie generała i centralnych urzędów znajdowało się serce zakonu, stąd czerpano wzorce dla wszystkich aspek-



Rys. 1. Rzut *Collegio Romano* wraz z kościołem Sant'Ignazio z najbliższym otoczeniem, 1. Piazza Sant'Ignazio, 2. Piazza del Collegio, 3. dziedzińiec szkoły, 4. ogród na dziedzińcu kolegium właściwego, na podstawie [17]

Fig. 1. Plan of *Collegio Romano* and Sant'Ignazio church with neighbourhood, 1. Piazza Sant'Ignazio, 2. Piazza del Collegio, 3. school courtyard, 4. garden on convent courtyard, based on [17]

tów działalności na terenie niekiedy bardzo odległych prowincji. Jednocześnie Włochy odgrywały wiodącą rolę w zakresie sztuki i architektury, przez co wypracowane tu rozwiązania powielane były w całej Europie. Mimo tej wiodącej roli same Włochy nie stanowiły jednak jednorodnej tkanki, poprzez odmienne uwarunkowania klimatyczne, polityczne i kulturalne w różnych regionach (od Sycylii po Mediolan) wykształciły się specyficzne rozwiązania architektoniczne [16]. Aby określić zasady kształtowania kolegiów w macierzystej prowincji jezuitów (podzielonej wtórnie na pięć mniejszych jednostek) należy skupić się na pierwszych fundacjach powstających w największych miastach włoskich.

Najbardziej reprezentatywnym budynkiem kolegium jezuickiego było niezaprzeczalnie *Collegio Romano* (rys. 1) wybudowane w Rzymie dzięki fundacji papieża Grzegorza XIII w latach 1582-1585 według projektu Giuseppe Valeriano. Mimo że uważany był za wzorcowe rozwiązanie przestrzenne kolegium, na

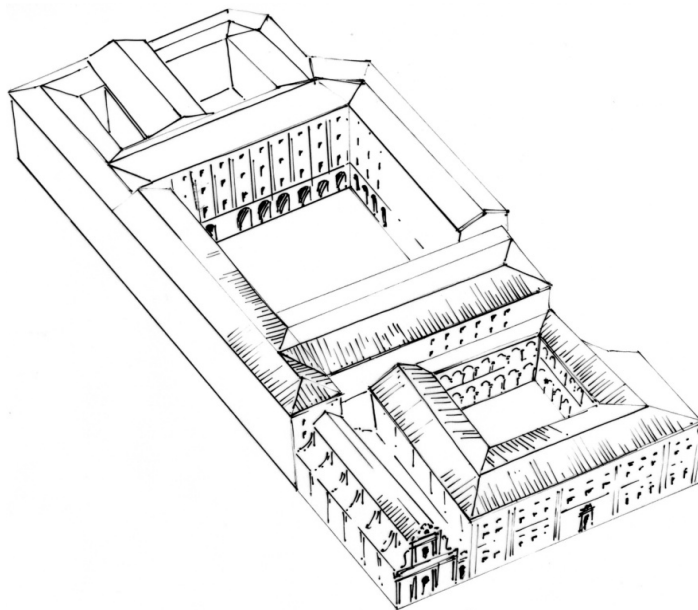
terenie Włoch nie spotykamy rozwiązań kopiujących bezpośrednio ten ściśle wpasowany w zastany układ urbanistyczny schemat rozplanowania funkcjonalnego. Ze względu na unikalne otoczenie przeznaczonej na kolegium działki dającej możliwość poprzedzenia budynku placem zarówno od północnej strony jak również od południa, po jednej stronie umieszczono kościół natomiast na jego tyłach zlokalizowano budynek szkoły zorganizowany wokół kwadratowego dziedzińca otoczonego szerokimi krużgankami. Kolegium właściwe (dom zakonny), okalające swój wewnętrzny dziedziniec - ogród, wypełniało natomiast pozostałą część działki po stronie wschodniej.

Należy zwrócić uwagę na opracowanie elewacji całego zespołu. Z bogatą w detal, dwukondygnacyjną fasadą kościoła, opracowaną w porządku korynckim oraz ujętą pilastrami jego elewacją boczną zestawione zostały surowe w wyrazie elewacje kolegium właściwego i szkoły. Symetryczna fasada szkoły z wyniesionym o jedną kondygnację bardzo płaskim ryzalitem jest starannie uporządkowana przez regularność rozmieszczenia osi okiennych oraz przez podkreślone odmienną fakturą materiału narożniki i gzymsy. Jej uporządkowana kompozycja organizuje przestrzeń całego placu sprawiając, że zespół kolegium jest niezaprzeczalną dominantą tej przestrzeni miejskiej. Boczne elewacje szkoły i domu zakonnego są natomiast bardzo uproszczone, jedyną ich dekorację stanowią proste, kamienne opaski wokół otworów okiennych.

Z kolei w głównym ośrodku na Sycylii - Palermo powstała (od 1615 do 1668 roku) cała seria rysunków projektowych dla nowego kolegium. Nie różnią się one między sobą zasadniczym ukształtowaniem zespołu. We wszystkich kolejnych projektach zachowana została jednakowa dyspozycja funkcji: na obszernej działce narożnie usytuowany był stosunkowo niewielki kościół, do którego nawy bocznej we wszystkich wariantach przylegał otoczony z czterech stron budynkami szkoły dziedziniec (rys. 2). Kolegium natomiast zajmowało rozległy teren za kościołem i szkołą. Ta podstawowa zasada rozmieszczenia poszczególnych funkcji w zespole wynikała z kształtu i lokalizacji działki, która jednym z krótszych boków przylegała do głównej ulicy miasta. Dlatego we wszystkich projektach w najbardziej reprezentacyjnej pierzei działki usytuowane zostały fasada kościoła oraz szkoły.

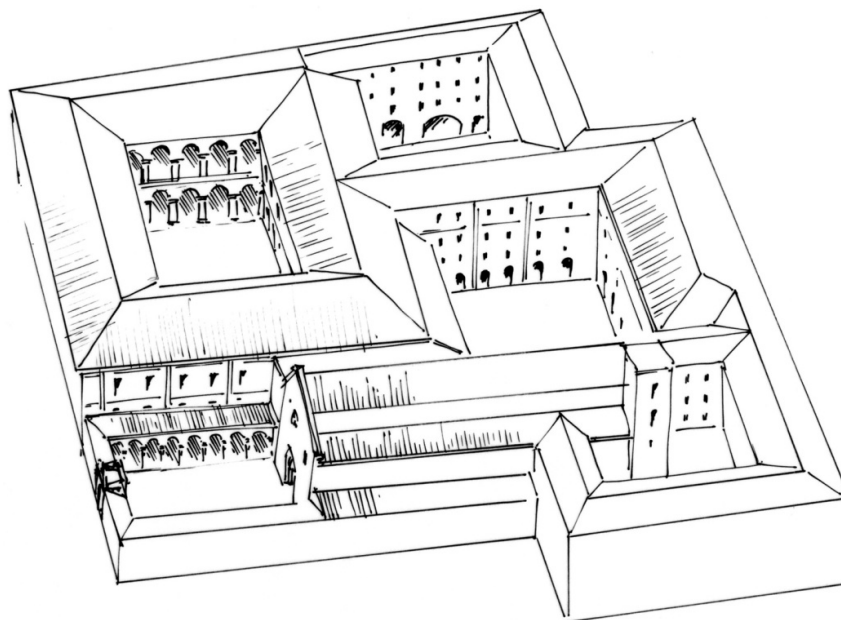
Różnice w kolejnych projektach widoczne są przede wszystkim w układzie wewnątrz kolegium właściwego. Prezentują one kilka wariantów ukształtowania wewnętrznych dziedzińców oraz usytuowania reprezentacyjnego pomieszczenia refektarza. Ze względu na inne warunki klimatyczne charakterystyczne jest odmienne niż w Rzymie rozwiązanie doświetlenia pomieszczeń. Na Sycylii, gdzie "ucieka się" przed nadmiarem słońca, do części sal szkolnych oraz pomieszczeń mieszkalnych światło dociera jedynie pośrednio przez szerokie krużganki.

W największym ośrodku północnych Włoch - Mediolanie jezuickie kolegium (rys. 3) ufundowane już w 1591 roku budowane było od lat 20-tych do połowy XVII wieku według rysunków Francesco Maria Richini'ego. Było to stosunkowo duże założenie usytuowane na działce (po zlikwidowanym klasztorze)



Rys. 2. Rekonstrukcja *Collegio Massimo* w Palermo, na podstawie [18 i 19]

Fig. 2. Reconstruction of *Collegio Massimo* in Palermo, based on [18 and 19]



Rys. 3. Rekonstrukcja *Collegio di Brera* w Mediolanie, na podstawie [18]

Fig. 3. Reconstruction of *Collegio di Brera* in Milano, based on [18]

-rze humiliatów) przylegającej do gotyckiego kościoła Santa Maria nella Brera. Kolegium (zwane *Collegio di Brera*) usytuowane było na skraju średniowiecznego obrysu miasta przy drodze prowadzącej do bramy miejskiej. Przy istniejącej bryle kościoła, o fasadzie wycofanej z pierzei tej ulicy, mediolański architekt zaprojektował kompleks budynków zorganizowanych wokół czterech dziedzińców, a fasadę kościelną poprzedził reprezentacyjnym przeddziedzińcem otoczonym krużgankami. Do budynku szkolnego, otaczającego dziedziniec umieszczony najbliżej głównej ulicy, prowadziło wejście umieszczone w krużgankach przed kościołem. Reprezentacyjne, monumentalne, otwarte na krużganki schody w części szkolnej zajmowały niedoświetlone skrzydło, na którego tyłach znajdowały się pomieszczenia kolegium właściwego.

Ceglane elewacje całego kompleksu ujęte zostały wydatnymi kamiennymi boniami, a otwory okienne uzyskały bogate obramienia z uszakami, gzymsami wspartymi na konsolach oraz naprzemiennie ułożonymi trójkątnymi oraz półowalnymi naczółkami. Bogatsze w tym kompleksie elewacje szkolne i klasztorne należy tłumaczyć brakiem przyciągającej uwagę fasady kościelnej, która wycofana z pierzei ulicznej pozostawiona została w swojej pierwotnej formie.

W Messynie na Sycylii, gdzie powstało pierwsze kolegium jezuickie prowadzące nauczanie w szkole publicznej, budowa docelowego zespołu miała miejsce dopiero w połowie XVII wieku. Wykonane przez neapolitańskiego architekta Giovanniego Gallo projekty zakładały rozplanowane zgodne z ogólnoprzyjętymi wzorcami. Na wydłużonej działce w jednej linii stanęły obok siebie kościół oraz szkoła i kolegium. Budynki ściśle wypełniły należącą do zakonu działkę pozostawiając jedynie wolną przestrzeń w postaci trzech kwadratowych w planie dziedzińców. Wszystkie dziedzińce posiadały bardzo regularną formę, otoczone były sklepionymi krużgankami nawet w miejscach gdzie do boku dziedzińca nie przylegały żadne pomieszczenia.

Szkoła została umieszczona w pomieszczeniach parteru dziedzińca bliższego kościołowi. Aby zapewnić bezpośrednie połączenie z przeznaczonymi dla uczniów emporami w kościele, w narożniku szkoły zaprojektowana została klatka schodowa łącząca korytarz szkolny z chórem.

W mniejszych miastach zespoły kolegiów były odpowiednio zredukowane, zazwyczaj zorganizowane wokół dwóch dziedzińców, bądź też czasem jednego wspólnego. W przeważającej części projektów budynek kościoła lokalizowany był w narożniku działki. Rozwiązanie z kościołem umieszczonym centralnie pomiędzy dziedzińcem szkolnym a dziedzińcem kolegium właściwego, które wydawało by się w sposób naturalny rozdziela część publiczną (dostępną dla świeckich) od części klauzuruwej, było we Włoszech dość rzadkie.

Wspomniany już wybitny architekt-jezuita: Giuseppe Valeriani SII był również między innymi autorem projektu dla niewielkiego kolegium w La Valetcie. W roku 1595 narysował projekt, w którym wszystkie elementy zostały bardzo silnie zredukowane. Obok kościoła umieszczony został tylko jeden dziedziniec (dostępny tylko dla zakonników) przylegający do jego nawy bocznej. Arkadowy

krużganek obsługiwał tylko jedno skrzydło kolegium, w którym mieściły się pokoje ojców, a pozostałe pomieszczenia dostępne były bezpośrednio z dziedzińca. Szkoła natomiast zajmowała tylko trzy sale na parterze w skrzydle frontowym, z czego jedna większa - narożna pełniła jednocześnie funkcję auli. Dostępna przez portal umieszczony centralnie w elewacji stanowiącej kontynuację frontu kościoła posiadała wyraźnie odseparowaną komunikację (zabudowany korytarz).

Podobnie zredukowany układ miało kolegium w Montepulciano projektu Orazio Grassi'ego SI (który pełnił przez pewien czas urząd consiliarius aedificiorum) zaprojektowane w 1632 roku. Przylegający do bocznej nawy kościoła dziedzińiec otaczały od frontu pomieszczenia szkolne (w parterze), a dwa pozostałe skrzydła mieściły kolegium.

Porównując kolegia jezuiickie zlokalizowane w różnych częściach Włoch możemy zauważyć, że o ile elewacje zewnętrzne szkoły i kolegium są raczej stonowane, opracowane bez użycia porządków architektonicznych, o tyle dziedzińiec szkolny otoczony jest dekoracyjnymi krużgankami wspartymi na kolumnach lub filarach ustawionych zgodnie z zasadą superpozycji porządków. Również klatki schodowe obsługujące część szkolną opracowywane były bardzo starannie, z szerokimi biegami otwartymi na krużganki. We Włoszech ze względu na łagodny klimat cała komunikacja w budynku szkolnym odbywała się na zewnątrz przez krużganki, natomiast w części kolegium dziedzińce posiadały krużganki tylko na poziomie przyziemia (ogrodu), nad którymi biegiły zabudowane korytarze lub umieszczano pokoje zakonników. Dlatego też elewacje dziedzińców przynależnych do domu zakonnego są bardzo proste, utrzymane w duchu ubóstwa i (poza delikatnymi podziałami gzymsów) pozbawione dekoracji.

Większe zespoły posiadały osobną przestrzeń rekreacyjną dla uczniów i osobną dla zakonników, a czasem również ogród i podwórze gospodarcze. W zależności od ilości dziedzińców oraz kształtu działki powstawały bardzo różne wzory geometryczne zespołów. W mniejszych miastach, gdzie uposażenie kolegium było często bardzo skromne, wszystkie elementy grupowane były wokół jednego podwórza. Dostęp do dziedzińca w takich przypadkach posiadali tylko zakonnicy co znacząco zmniejszało komfort uczniów. We włoskich kolegiach charakterystyczne jest dążenie do wyraźnego zamknięcia budynkami wewnętrznej przestrzeni, która będzie wizualnie i funkcjonalnie całkowicie odcięta od świata zewnętrznego.

3. Architekci jezuiicki działający w prowincji polskiej i litewskiej: Włosi i ich uczniowie

W pierwszym okresie działalności budowlanej jezuitów na terenie Polski i Litwy (od momentu sprowadzenia Towarzystwa Jezusowego w 1564 roku do Potopu Szwedzkiego) olbrzymi wpływ na formę powstających kolegiów mieli Włosi. W tym okresie architektami projektującymi i nadzorującymi budowy jezuiickich zespołów budowlanych byli wyłącznie bracia zakonni, a wśród nich najbardziej wyróżniają się postacie włoskich jezuitów (Massima Milaneseiego, Józefa

Brizio, Jana Marii Bernardoniego, Giacoma Briana oraz Benedetta Mollego) wykształconych w sztuce architektury jeszcze na ojczystej ziemi, którzy na prośbę polskich prowincjałów byli delegowani aby nadzorować tutejsze budowy. Pozostali architekci działający w tym okresie to polscy jezuiti, którzy pomagając włoskim mistrzom sami zdobyli potrzebne do projektowania umiejętności [20].

Pierwszym przebywającym na terenie Polski architektem jezuickim był Florentczyk - brat Massimo Milanese (1529-1588). Pomimo że projektował, nie był z wykształcenia architektem, ale pełnił rolę dworzanina na dworze cesarza w Wiedniu. Wstąpił do zakonu jezuitów dopiero w Braniewie w roku 1570. Pierwszymi znanymi projektami jego autorstwa były rysunki kolegium św. Jana w Jarosławiu pochodzące z lat 1574-76. W 1582 roku został przeniesiony do nowego kolegium w Kolożwarze, gdzie sporządził projekt seminarium papieskiego. Wysłany do innego kolegium w Siedmiogrodzie, do Białogrodu, sporządził w 1585 roku projekt dla zespołu budynków z czterema dziedzińcami (z zaadaptowaniem istniejącego kościoła i klasztoru gotyckiego).



Rys. 4. Rozmieszczenie kolegiów jezuickich w prowincji polskiej i litewskiej - stan około połowy XVII wieku, 1. ośrodki działania włoskich architektów-jezuitów; 2. kolegia zrealizowane przez polskich budowniczych; 3. kolegia działające w budynkach zaadaptowanych na potrzeby jezuitów lub budynkach tymczasowych, na podstawie [21]

Fig. 4. Map of Jesuit colleges in Polish and Lithuania Province - about half of 17th century, 1. places of Italian Jesuit architects work, 2. colleges built by Polish architects, 3. colleges placed in adapted and temporary buildings, based on [21]

W 1575 roku do Polski przybył kolejny włoski architekt-jezuita Józef Brizio (1533-1604), który pracował wcześniej pod kierunkiem Giovanniego Tristano podczas budów w Rzymie: kolegium, kościoła del'Annunziata i nowicjatu na Kwirynale. W Polsce pracował w Jarosławiu przy budowie kolegium a następnie kościoła św. Jana. W 1586 roku przebywał w Lublinie nanosząc poprawki na projekt kościoła. W 1591 nadzorował budowę kopuł kościołów w Lublinie i Nieświeżu. W latach 1593-95 wykonał projekty dla zespołów jezuiickich w Krakowie: dla rozbudowy domu i kościoła św. Barbary oraz dla domu i kościoła przy ul. Wiślanej, dla domu profesów przy ul. Grodzkiej oraz dla kościoła św. Piotra i Pawła.

Kolejnym włoskim architektem działającym w Rzeczypospolitej był Jan Maria Bernardoni (1541-1605), który będąc doświadczonym architektem zakonnym został wysłany do prowincji polskiej w 1583 roku. Na początku został wysłany do Poznania gdzie sporządził projekt dla kościoła i kolegium. Następnie odesłany do Lublina sporządził plany dla kolegium (przebudowa kamienic) i rozpoczął budowę kościoła za murami miejskimi. W latach 1586-99 Bernardoni przebywał w Nieświeżu, gdzie wybudował kościół Bożego Ciała oraz kolegium. W tym okresie sporządził również projekty dla kościoła i kolegium w Kaliszu. Z Nieświeża został przeniesiony do Krakowa, aby kierować tam (po J. Brizio) budową kościoła św. Piotra i Pawła.

Giacomo Briano (1589-1649), który pochodził z architektonicznej rodziny z Modeny w 1616 r. na własną prośbę został wysłany do prowincji polskiej gdzie brakowało w tym czasie zakonnego architekta. Początkowo pracował przy budowie kościoła w Łucku, następnie został przeniesiony do Lwowa, gdzie sporządził nowe projekty dla rozpoczętego już kościoła, którego budowę następnie nadzorował. W latach 1618-19 czuwał nad budową kolegium w Sandomierzu, po czym przebywał w Krakowie i Lublinie oraz powtórnie w Łucku i Lwowie. W tym okresie wykonał także rysunki dla projektu rozbudowy kościoła w Jarosławiu. W roku 1621, w drodze powrotnej do Włoch, Briano pomierzył plac pod fundację w Przemyślu po czym, już w ojczyźnie, wykonał projekt dla kościoła i kolegium. Po raz kolejny Giacomo Briano został przysłany do Polski na prośbę Anny Alojzy z Ostrogskich Chodkiewiczowej - fundatorki kolegium w Ostrogu. Przy budowie tego kolegium pracował w latach 1630-32. W tym okresie bywał także we Lwowie sporządzając nowy projekt dla kolegium.

Benedetto Molli (1597-1657) wstąpił do zakonu jezuitów już będąc wykształconym w sztuce architektury. Jako zakonny architekt przebywając we Włoszech narysował projekt dla kolegium w Montepulciano oraz kierował budową rzymskiego *Collegium Germanicum*. Do Polski został wysłany w roku 1633 lub 1634 aby dokończyć prace przy zespole budynków jezuiickich w Ostrogu. Podczas swojej obecności w Polsce Molli poza wykonaniem ostatecznego projektu dla kolegium w Ostrogu wykonał rysunki projektowe dla kolegium w Łucku oraz dla rozbudowy kolegium św. Piotra w Krakowie [21].

Patrząc na rozmieszczenie zespołów kolegiów jezuiickich zrealizowanych do połowy XVII wieku (rys. 4) widać, iż znaczna ich część wybudowana była przy

udziale włoskich architektów. Ważny jest także fakt iż prawie wszyscy działający w tym okresie polscy architekci wykształcili się pod okiem przebywających tu włoskich mistrzów. Czy w projektach i realizacjach polskich kolegiów widać bezpośrednie przeniesienie wzorców z Italii, czy może lokalne uwarunkowania wymusiły zmiany pewnych rozwiązań?

4. Polskie recepcje włoskich wzorców

Aby odpowiedzieć na nasuwające się pytania należy przeanalizować projekty i realizacje kolegiów z pierwszego okresu działalności budowlanej jezuitów (do Potopu Szwedzkiego), kiedy za znaczną jej część odpowiadali włoscy architekci.

Massimo Milanese SI projektując w 1585 roku kolegium w Białogrodzie (ówcześnie w granicach prowincji polskiej) zaproponował bardzo rozbudowany układ z czterema dziedzińcami o rzucie zbliżonym do kwadratów (rys. 5). Część szkolna stykała się narożnikiem z kościołem tworząc razem z nim ramy dla przykolegialnego placu będącego swego rodzaju aneksem głównego rynku miejskiego. Podobnie jak we Włoskich wzorcach Milanese rozwiązał komunikację na dziedzińcach części klauzuruwej (na parterze krużganki, a na piętrze zabudowane korytarze). Inne rozwiązanie zaproponował z kolei dla budynku szkoły: sale lekcyjne usytuowane na parterze dostępne były bezpośrednio z otwartego dziedzińca, natomiast zamknięta klatka schodowa prowadziła na niewielki wewnętrzny korytarz na piętrze, gdzie architekt umieścił szkolną aulę i salę kongregacji (kaplicę sodalicyjną). Takie rozwiązanie podyktowane było przede wszystkim warunkami klimatycznymi oraz dbałością o lepsze doświetlenie pomieszczeń lekcyjnych. Na zachowanych rzutach [18] nie widać na zewnętrznych elewacjach, ani na wyższych kondygnacjach wewnętrznych elewacji użycia porządków architektonicznych. Co więcej nie wszystkie otwory okienne zachowują pionowe osie, a na dziedzińcach nie są skorelowane z przęsłami krużganków. Należy więc wnosić, iż były bardzo skromne, a miejscami wręcz nieuporządkowane.

Z kolei w Nieświeżu kolegium wybudowane według projektu Jana Marii Bernardoniego było odsunięte od bryły kościoła. Symetryczny budynek otaczał zamknięty krużgankami dziedziniec domu zakonnego. W parterze jednego ze skrzydeł umieszczone zostały cztery sale lekcyjne dostępne bezpośrednio z wydzielonego szkolnego podwórza. Szkolny dziedziniec podobnie jak w Białogrodzie nie posiadał krużganków ze względu na konieczność doświetlenia sal. Ostatecznie jednak podczas realizacji szkolny dziedziniec zamieniono na gospodarczy, a sale szkolne dostępne były z krużganka głównego dziedzińca. Architekt silnie podkreślił strefę wejścia do kolegium przez umieszczenie jej w wydatnym, wspartym na arkadach, ryzalicie zwieńczonym wieżą zegarową. Takie rozwiązanie frontowej elewacji jest wyraźnym nawiązaniem do rzymskiego wzorca. Bernardoni pomimo braku artykulacji na elewacjach dba o utrzymanie porządku przez rytmiczne ustawienie osi okiennych. Elewacje otrzymały ponadto dekoracyjne szczyty ze spływami wolutowymi [22].

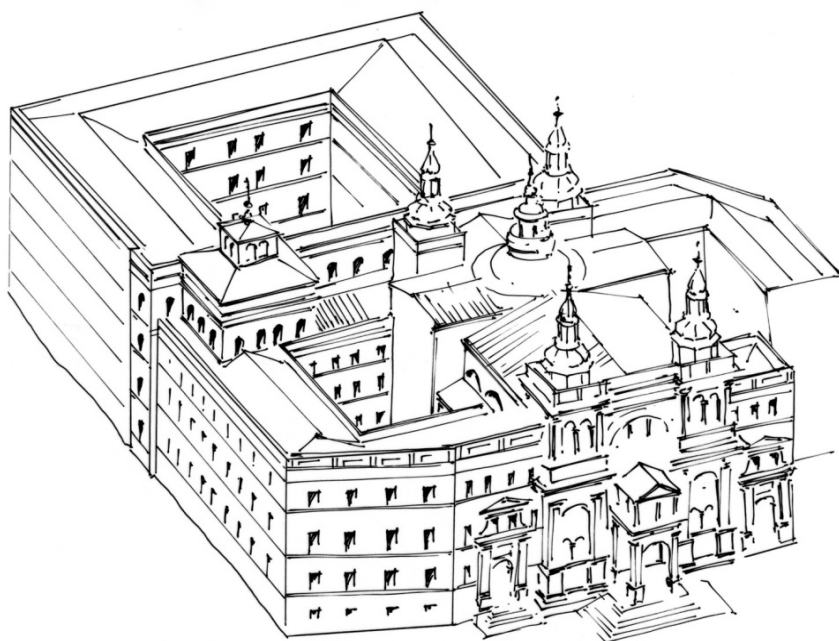


Rys. 5. Projekt kolegium w Białogrodzie wraz z najbliższym otoczeniem, 1. rynek miejski, 2. kolegium jezuickie, 3. fara miejska, na podstawie [18]

Fig. 5. Design of College in Alba Iulia with neighbourhood, 1. town market, 2. Jesuit college, 3. parish church, based on [18]

W kolegium w Przemyślu (rys. 6) architekt Giacomo Briano całkowicie odstąpił od stosowania otwartych krużganków. Wszystkie ciągi komunikacyjne poprowadzone zostały wewnętrznymi korytarzami. Umieszczając kościół w najbardziej eksponowanym miejscu działki Briano uzyskał plan zespołu z trzema dziedzińcami oraz podwórzem gospodarczym. Część szkolna przysunięta została do nawy bocznej kościoła, a wejście do niej, ujęte w formę edikuli, znajdowało się tuż obok kościelnej fasady. Z rozrzeźbioną dwukondygnacyjną fasadą kościoła zwieńczoną dwiema wieżami architekt skontrastował bardzo stonowane elewacje zespołu. Ich jedyną dekoracją stanowiły portale na tle rytmicznie ustawionych osi okiennych z podkreślonymi za pomocą płaskich gzymsów kordonowych poziomami [23]. Cały zespół tworzył zwartą, masywną bryłę wyróżniającą się w rozdrobnionej tkance miejskiej.

Ten sam architekt zaprojektował zespół kolegium obok istniejącego już kościoła w Lublinie. Ze względu na ukształtowanie działki oraz usytuowanie kościoła poza murami miejskimi zaproponował wyjątkowe rozwiązanie z wewnętrznym, ale ogólnodostępnym dziedzińcem stanowiącym plac przed fasadą kościoła. Pozo-



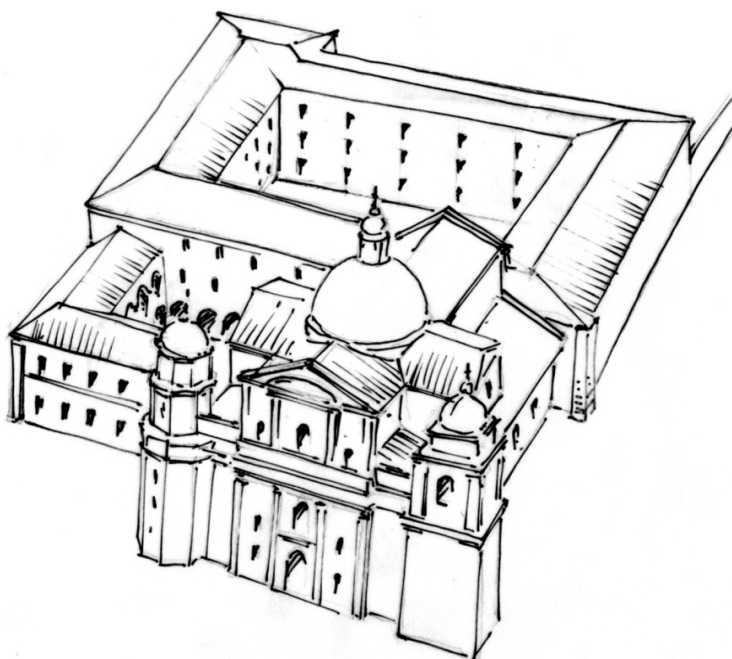
Rys. 6. Wizualizacja projektu Giacomo Briana dla kolegium w Przemyślu, na podstawie [23]

Fig. 6. Visualisation of Giacomo Briano's design for College in Przemyśl, based on [23]

stałe budynki zorganizował wokół prostokątnych dziedzińców: szkolnego oraz klauzurowego. Podczas gdy zewnętrzne elewacje Briano pozostawił, podobnie jak w Przemyślu, gładkie i pozbawione bogatej dekoracji, elewacje dziedzińców zrytmizował przez zastosowanie pilastrów o zdwojonych krawędziach [24]. Było to podyktowane po części specyficznym układem zespołu - z kościołem dostępnym z dziedzińca, a nie widocznym i wyeksponowanym w pierzei ulicznej, a po części chęcią poprzedzenia fasady kościelnej reprezentacyjną przestrzenią. W tym kolegium architekt umieścił szkołę z jej wewnętrznym niewielkich rozmiarów dziedzińcem obok bocznej nawy kościoła, natomiast część klauzurową zlokalizował po przeciwnej stronie ogólnodostępnego dziedzińca. Podobnie jak w innych projektach we wszystkich częściach zespołu poprowadził komunikację zamkniętymi korytarzami.

Briano sporządził także projekt dla kolegium we Lwowie. Ze względu na ograniczoną murami miejskimi działkę, wszystkie funkcje zostały tutaj zgrupowane wokół jednego wspólnego dziedzińca. Sale szkolne obsługiwane korytarzami biegnącymi wzdłuż ściany dziedzińca umieszczone zostały w skrzydle frontowym na parterze i na piętrze. Na wyższej kondygnacji zlokalizowano także szkolną aulę. Charakterystyczne jest umieszczenie refektarza oraz znajdującej się nad nim biblioteki. Pomieszczenia te znalazły miejsce w przeciwnym do kościoła narożniku zespołu, w wysuniętym poza obrys ryzalicie. Podobne rozwiązanie widać także na projekcie dla kolegium w Lublinie.

Ostatnim z włoskich architektów-jezuitów projektujących w prowincji polskiej był Benedykt Molli. Jego projekt dla kolegium w Łucku (przy wybudowanym już kościele) zakładał rozwiązanie przestrzenne z dwoma dziedzińcami na planie kwadratu (rys. 7). Sale szkolne umieścił na dwóch piętrach, w dwóch skrzydłach otaczających dziedziniec przylegający do nawy bocznej kościoła, który zaprojektował jako otoczony otwartymi krużgankami². Kolegium właściwe umieszczone zostało wokół obszernego, regularnego podwórza umieszczonego za bryłą kościoła. Komunikację w części klauzurowej architekt poprowadził wewnątrz korytarzami, a na dziedzińcu zaprojektował ogród o rozbudowanym układzie geometrycznych kwater [25].



Rys. 7. Wizualizacja projektu Benedetta Mollego dla kolegium w Łucku, na podstawie [18]

Fig. 7. Visualisation of Benedetto Molli's design for College in Łuck, based on [18]

5. Podsumowanie

Powróćmy zatem do postawionego pytania o polski nurt jezuicki. Przyglądając się przywołanym przykładom, a także licznym innym obiektom trzeba zauważyć, że architektura polskich kolegiów w znacznej mierze oparta była na wzorcach

² Część szkolna nie została jednak zrealizowana w tej formie, tylko zlokalizowano ją w parterze jednego ze skrzydeł domu zakonnego.

włoskich. Zwłaszcza w okresie do Potopu Szwedzkiego preferowane były rozwiązania z budynkami zorganizowanymi wokół zamkniętych dziedzińców z narożnikowo usytuowaną bryłą kościoła, która odcinała się od pozostałych budynków starannością opracowania architektonicznego i rzeźbiarskiego. Trzeba jednak zaznaczyć, że opracowanie elewacji kościołów (poza nielicznymi wyjątkami) było jednak bardziej umiarkowane niż we Włoszech. Szczególnie w miastach uboższych, zwłaszcza na wschodzie, gdzie dominowała prosta, często drewniana architektura, aby nie wywoływać zbyt dużego rozdziwku, jezuici projektowali elewacje znacznie skromniejsze od wzorców włoskich. W Polsce opracowanie elewacji kolegium i szkoły było staranne, ale w budownictwie pierwszego okresu działalności Towarzystwa niezbyt bogate. Otwory okienne tylko w części obiektów uzyskały obramienia, a podziały płaszczyzny ścian zaznaczane były (jeśli w ogóle) w sposób bardzo delikatny. Podobnie jak w Italii staranne opracowanie zyskują portale wejściowe do szkoły i kolegium, które skonstrastowane z gładką ścianą stanowią silne akcenty kompozycyjne.

Najbardziej widoczne są zmiany wzorców wynikające z przystosowania do odmiennych warunków klimatycznych. Otwarte krużganki nie sprawdzały się w długim okresie jesienno-zimowym, a niewielka ilość światła docierająca w tym okresie do okien również przemawiała za ich likwidacją. Powodowało to rezygnację z reprezentacyjnego arkadowego dziedzińca szkolnego i starannie opracowanej głównej klatki schodowej (która w Polsce najczęściej była zamknięta i przez to o wiele mniej eksponowana). Podyktowane było to również względami klimatycznymi: we Włoszech ten "galowy" dziedziniec mógł służyć różnym publicznym przedsięwzięciom: przedstawieniom, misteriom czy deklamacjom, natomiast w Polsce warunki klimatyczne nie pozwalały przez większość roku na organizację takich przedsięwzięć na otwartym powietrzu i były one organizowane we wnętrzach: w auli szkolnej lub we wnętrzu kościoła. Mimo że początkowo, bezpośrednio kopiując rozwiązania włoskie, projektanci proponowali otwarte krużganki, były one w kolejnych projektach, lub już w trakcie użytkowania obiektu wtórnie zamurowywane ze względu na ich niefunkcjonalność.

Bardzo charakterystycznym rozwiązaniem stosowanym w prowincji polskiej jest specjalne miejsce jakie uzyskał refektarz oraz umieszczona nad nim biblioteka. Po części również ze względów oświetleniowych pomieszczenia te umieszczone były w delikatnym ryzalicie (najczęściej na narożniku budynku), aby przez lepsze doświetlenie uzyskały bardziej reprezentacyjny charakter.

Jak widać wpływem lokalnym przede wszystkim podlegała dekoracja i opracowanie elewacji. Układ funkcjonalny natomiast, zachowując ogólne zasady rozplanowania, zawsze dostosowany był do miejsca, ze względu na konieczność wpassowania się w istniejącą już, skomplikowaną tkankę miasta. Różnice w przestrzennym rozmieszczeniu elementów wynikają przede wszystkim z kształtu działki jaką dysponował zakon oraz z jej usytuowania w strukturze miasta, a nie z lokalnych preferencji.

W polskich kolegiach struktura wewnętrzna stosowana we włoskich zespółach jezuickich uległa bardzo niewielkim modyfikacjom. Również szata styli-

styczna (mimo że często skromniejsza) była silnie związana z wzorcami włoskimi. Takie wyraźne przywiązanie do wzorcowych, rzymskich rozwiązań niewątpliwie związane było z silną obecnością w prowincji polskiej architektów pochodzących z Italii, którzy nie tylko sami projektowali i wznosili w Polsce kolegia, ale także wychowywali kolejne pokolenia polskich architektów-jezuitów.

Literatura

- [1] Paszenda J.: Losy tak zwanego stylu jezuickiego, *Biuletyn Historii Sztuki*, Tom 62, Numer 1/2, 2000, s. 163-174.
- [2] Dainville de F.: *La Légende du style jésuite*, *Etudes*, n° 287, 1955, pp. 3-16.
- [3] Christ Y.: *Le style jesuite n'existe pas*, *Jardin des arts*, n° 86, 1962, pp. 44-49.
- [4] Pirri P.: *Giovanni Tristano e i promordi della architettura gesuitica*, *Institutum Historicum Societatis Iesu*, Rzym 1955.
- [5] Moisy P.: *Les églises des jésuites de l'acière assistance de France*, *Institutum Historicum Societatis Iesu*, Rzym 1958.
- [6] Vallery-Radot J.: *Le recueil de plans d'édifices de la Compagnie de Jésus conservé à la Bibliothèque nationale de Paris*, *Institutum Historicum Societatis Iesu*, Rzym 1960.
- [7] Bösel R.: *Jesuitenarchitektur in Italien (1540-1773)*, I. Die Baudenkmäler der römischen und der neapolitanischen Ordensprovinz, II. Die Baudenkmäler der mailändischen Ordensprovinz, *Österreichischen Akademie der Wissenschaften*, Wien 1985-2007.
- [8] Bencivenni M.: *L'architettura della Compagnia di Gesù in Toscana*, *Alinea*, Firenze 1996.
- [9] Paszenda J.: *Budowle jezuickie w Polsce XVI-XVIII w.*, tom 1-5, *Wyższa Szkoła Filozoficzno-Pedagogiczna „Ignatianum” – Wydawnictwo WAM*, Kraków 1999-2013.
- [10] Bailey G.: *Le style jesuite n'existe pas: Jesuit Corporate Culture and the Visual Arts*, *The Jesuits: cultures, sciences, and the arts, 1540-1773*, Vol. 1, *University of Toronto Press*, Toronto 1999.
- [11] Levy E.: *Propaganda and the Jesuit Baroque*, *University of California Press*, Berkeley 2004.
- [12] Marino A.: *L'idea di tradizione e il concetto di modernità nell'architettura della Compagnia di Gesù*, *L'architettura della Compagnia di Gesù in Italia. XVI-XVIII secolo*, *Centro Culturale S. Fedele*, Milano 1992, pp. 53-56.
- [13] Galantowicz B.: *Rozwiązania urbanistyczne barokowych zespołów budowli jezuickich na Śląsku a problem akomodacji w działalności misyjnej jezuitów*, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 1997.
- [14] Smith J.C.: *Sensuous Worship: Jesuits and the Art of the Early Catholic Reformation in Germany*, *Princeton University Press*, Princeton 2002.
- [15] O'Malley J.: *Pierwsi jezuici*, *Wydawnictwo WAM*, Kraków 1999.
- [16] Bosel R.: *Episodi emergenti dell'architettura gesuitica in Italia*, *La arquitectura jesuítica. Actas del Simposio Internacional*, *Institucion Fernando el catolico (C.S.I.C.)*, Zaragoza 2012, pp. 71-89.

- [17] Patetta L., Balestreri I., Coscarella C., Zocchi D.: *L'architettura della Compagnia di Gesu in Italia XVI-XVIII sec.*, Grafo, Brescia 1990.
- [18] <http://gallica.bnf.fr> (dostęp 05.10.2016 r.).
- [19] <https://www.maremagnum.com/stampe/palermo-pianta-della-citta-di-palermo/130083158> (dostęp 05.10.2016 r.).
- [20] Paszenda J.: *Architekci jezuitcy w Polsce, Praxis atque theoria. Studia ofiarowane profesorowi Adamowi Małkiewiczowi*, IHS UJ, Kraków 2006, s. 245-253.
- [21] Poplatek J., Paszenda J.: *Słownik jezuitów artystów*, Wydawnictwo WAM, Kraków 1972.
- [22] Paszenda J.: *Kościół Bożego Ciała (pojezuicki) w Nieświeżu*, *Kwartalnik Architektury i Urbanistyki*, Tom 21, Nr 3, 1976, s. 195-216.
- [23] Betlej A.: *Projekty Kościoła Jezuitów w Przemyślu. Uwagi na temat rysunków Giacomo Briano ze zbiorów The Getty Research Institute*, *Sprawozdania z czynności i posiedzeń PAU*, 65, 2001, s. 131-133.
- [24] Paszenda J.: *Lubelskie projekty Michała Hintza i Jakuba Briano*, *Kwartalnik Architektury i Urbanistyki*, Tom 17, Nr 1, 1972, s. 41-58.
- [25] Paszenda J.: *Dzieje budowy kościoła i Kolegium Jezuitów w Łucku według źródeł jezuitckich*, *Kwartalnik Architektury i Urbanistyki*, Tom 45, Nr 1, 2000, s. 34-44.

ARCHITECTURE OF JESUIT COLLEGES IN ITALY AND POLAND – ATTEMPT OF COMPARISON

Summary

At the end of 16th century, when the Society of Jesus started their activity in Poland, the same they started to build convent houses. Colleges, founded by bishops and aristocrats, were independent units in which Jesuits were running their schools.

The first builders of those colleges were Italian Jesuits skilled in architecture. Formed by Italian architecture paradigm, they used solutions they knew. But according to the rule of accommodation to local needs and conditions, they adjusted their designs to local circumstances to assure their proper functioning there.

Despite clearly visible similarities, especially in general planning the elements of the complex, in Polish transpositions of Italian models, their specific features are evident. Comparing functional and architectonic solutions applied in colleges in Poland and Italy allows to determine how strong the local influence on basic models was. Different climate conditions resulted in separating communications from the yards and also in other way of using the latter. And also poorer neighbourhood (specially in smaller towns) lead to the simpler and less decorative facades. Last but not least it should be emphasized the necessity to conform to the specific situation: the shape of the plot and the shape of surrounding buildings by using existing scenic axes and connections. The above makes every Jesuit complex one-off and shows the philosophy of Society of Jesus in the fullest way.

Keywords: Society of Jesus, Jesuit architects, Jesuit style, Jesuit schools

Przesłano do redakcji: 15.10.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Marek GOSZTYŁA¹
Stanisław LEŚ²
Krystian SIKORSKI³

PRELIMINARIA NAD STANEM BADAŃ PRAKTYKI KONSERWATORSKIEJ W RZESZOWIE

W niniejszym artykule poruszono problematykę konserwacji obiektów zabytkowych w zakresie przeciwdziałania negatywnym skutkom transportu wody wewnątrz muru. Często spotykanym zjawiskiem jest niszczenie przegród zewnętrznych w strefie przyziemnej oraz w wyższych partiach. Najpowszechniejszą przyczyną degradacji są nieprawidłowe rozwiązania w zakresie odtworzenia izolacji pionowej i poziomej muru oraz wykonania wadliwych tynków renowacyjnych, pomalowanych farbami o niskiej dyfuzji wody. W związku z tym zwrócono uwagę na przyjęte rozwiązania systemowe, a także na metodykę wykonania prac związanych z konserwacją. Pierwszym obiektem, którego stan istniejący został przebadany jest Klasztor O.O. Bernardynów w Rzeszowie. Obiekt mimo niedawnych (okres 10 lat) prac związanych z odtworzeniem izolacji oraz tynków renowacyjnych wykazuje duży stopień degradacji spowodowanej transportem wody wewnątrz struktury muru. Kolejnym obiektem referencyjnym jest Kościół WNMP na osiedlu Załesie w Rzeszowie. Ocena stanu istniejącego poddała pod wątpliwość istnienie oraz jakość wykonanej izolacji przegród. Jako ostatnia zestawiona została kamienica nr 2 zlokalizowana przy ul. płk. Leopolda Lisa-Kuli w Rzeszowie. Istniejący stan kamienicy podobnie jak w przypadku poprzednich obiektów wskazuje na wadliwe rozwiązania systemowe. Mając na względzie fakt, iż wskazane obiekty są jedynie odsetkiem wyłonionym z większego spektrum zastanowić należy się nad myślą z preambuły Karty Krakowskiej 2000, przypominającej o obowiązku pielęgnacji dziedzictwa kulturowego. Przykrym jest zjawisko polegające na złudnej redukcji kosztów związanych z naprawą starego budownictwa. Dodatkowo należy podkreślić, iż rażące braki w dokumentacji dotyczą nawet obiektów o wysokiej wartości architektoniczno-kulturowej.

Słowa kluczowe: woda w obiekcie, izolacja pionowa, izolacja pozioma, tynk renowacyjny

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Marek Gosztyła, Politechnika Rzeszowska, Katedra Konserwacji Zabytków, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, gosztyla@prz.edu.pl

² Stanisław Leś, Technolog PCI, stanislaw.les01@gmail.com

³ Krystian Sikorski, doktorant WBiSiA PRz, mr.krystian.sikorski@gmail.com

1. Wstęp

Zagadnienie konserwacji obiektów zabytkowych jest tematem rozwojowym (ze względu na nieustający rozwój technologii), a zarazem obciążonym dużym stopniem trudności gdyż ingerencja w obiekt związana jest z ryzykiem utraty jego walorów architektonicznych lub dalszymi procesami degradacji.

Omawiając problematykę konserwatorską warto zwrócić uwagę, iż spora część publikacji uwzględnia historię obiektów i teorię konserwatorską związaną z ich ochroną. Mniejszą uwagę przywiązuje się do praktycznej strony zagadnienia. Nierzadko przytaczana metodyka wykonania robót jest ogólnikowa (bez dokładniejszego ich opisanie). Tendencję taką, zauważyć można, również w ekspertyzach wykonywanych przez osoby posiadające konkretne kompetencje.

Analizując proces konserwacji zabytków, podzielić możemy go na cztery podstawowe etapy: przedprojektowy (inwentaryzacja i ocena stanu technicznego obiektu wraz z szerokim spektrum badawczym), projektowy (zaproponowanie sposobów naprawy przy użyciu określonych materiałów), wykonawstwa (przeprowadzenie przewidywanych robót) oraz eksploatacji.

Na każdym z poszczególnych etapów dojść może do popełnienia błędów, które zaburzą prawidłowe działanie mechanizmu.

W tym miejscu zwrócić uwagę należy na myśl wynikającą z preambuły Karty Krakowskiej 2000, która przypomina, iż wraz ze zmianą ustroju zaszło zjawisko demokratyzacji zabytków i to na naszych barkach spoczywa obowiązek prawidłowego zarządzania własnym dziedzictwem [5].

2. Wybór obiektów referencyjnych

Chcąc dokładnie przyjrzeć się zagadnieniu praktyki konserwatorskiej, przeanalizowano obiekty usytuowane w Rzeszowie. Jako pierwszy spośród nich wybrano jeden ze znaczących, jakim, bez wątpienia, jest Klasztor O.O. Bernardynów. Sprzyjającym jest fakt, iż obiekt ten w ostatnich latach przechodził szereg prac konserwatorskich. Kolejno uwagę poświęcono Kościołowi Wniebowzięcia Najświętszej Maryi Panny oraz kamienicy nr 2 przy ulicy płk. Leopolda Lisa-Kuli.

Ze względu na przyjęty zakres zagadnienia w artykule skupiono się na sposobach zabezpieczania murów przed szkodliwym oddziaływaniem wód.

3. Woda w obiekcie

Przy niewłaściwej eksploatacji bądź wadliwie wykonanym zabezpieczeniu lub, w przypadku obiektów zabytkowych, jego braku (pamiętać należy iż w przypadku obiektów datowanych na pół wieku i starszych, które nie były poddane procesom konserwacji mamy 99% pewności, iż izolacja przeciwwilgociowa nie spełnia wymaganych założeń) woda wnika w głąb struktury materiałów,

z których wykonano poszczególne elementy budynku. Bezpośrednim tego efektem jest zwiększenie wilgotności przegród, któremu towarzyszy proces ich zasalania przez sole mineralne. Do najpowszechniej spotykanych rodzajów soli zaliczamy siarczany, chlorki, azotany oraz węglany [2]. Prawdopodobne rozpoznanie soli znajdujących się w elemencie pozwala na sprecyzowanie przyczyny powstawania mechanizmu zawilgocenia. Praktyka wskazuje, iż największe stężenie chlorków bądź azotanów stwierdzić można przy zawilgoceniu pochodzącym z gruntu, natomiast wysoka zawartość siarczanów wskazuje na kwaśne deszcze [3]. Osobnymi przypadkami są: zjawisko zasolenia pierwotnego, które w odniesieniu do obiektów zabytkowych będzie mniej prawdopodobne (ewentualne zasolenie przez stosowanie impregnatów do elementów organicznych) oraz zjawisko uaktywniania soli spowodowane wilgotnością higroskopijną (zła eksploatacja obiektu). Konsekwencją występowania poszczególnych zjawisk lub (co jest bardziej prawdopodobne) ich skumulowania jest obniżenie walorów estetycznych i właściwości wytrzymałościowych elementów wchodzących w skład budynku, co bezpośrednio przekłada się na stateczność całej konstrukcji. Kolejnym niekorzystnym efektem zawilgocenia muru jest wzrost kosztów eksploatacji związany z utrzymaniem ciepła. Przyczyną niekorzystnego stanu jest wzrost przewodnictwa cieplnego mokrej przegrody. Doskonałym przykładem jest cegła ceramiczna, której współczynnik przewodzenia ciepła w warunkach średnio wilgotnych równy jest $\lambda=0,77\text{W/m}\cdot\text{K}$, natomiast w sytuacji 15% zawilgocenia (zgodnie z normami w przypadku zawilgocenia $>12\%$ klasyfikowany jako mur mokry) oscyluje w granicach $\lambda=1,6\text{W/m}\cdot\text{K}$ [4] (pamiętać należy, iż bez rozwiązania problemu zawilgocenia nie ma możliwości poprawy sytuacji termicznej, termomodernizacje w danej sytuacji są bezskuteczne). Dodatkowym zagrożeniem wynikającym z nadmiernej ilości wody w elemencie jest możliwość występowania drobnoustrojów w postaci grzybów oraz występowaniem owadów, które pogarszają lub uniemożliwiają dalsze użytkowanie obiektu, a także narażają elementy organiczne konstrukcji na degradację.

4. Klasztor O.O. Bernardynów

4.1. Powstanie klasztoru

Świątynię OO. Bernardynów wybudowano w I połowie XVII w., zlokalizowana została w miejscu, w którym uprzednio stał drewniany kościółek powołania Wniebowzięcia Panny Marii wybudowany w celu uczczenia objawienia się Matki Bożej z 1513 roku. Murowany kościół zawdzięcza swe istnienie ówczesnemu właścicielowi miasta Mikołajowi Spytko Ligęzie. Budowa rozpoczęta w 1624 roku, przez budowniczych z Lipska, trwała 5 lat do roku 1629 kiedy to Ligęza przekazał ją Bernardynom [6].

4.2. Praktyki konserwatorskie przed rokiem 2001

W pierwszych latach funkcjonowania świątyni wykonano polichromię, a na przełomie XIX i XX wieku gruntownie ją odnowiono. Prace restauracyjne wykonano pod nadzorem Zygmunta Hendla, który zaproponował projekt wyposażenia kościoła oraz jego możliwego przekształcenia [1]. Realizacji doczekały się jedynie założenia związane m.in. z przebudową Ołtarza Głównego czy kryptą grobową rodziny Ligęzów.

W roku 1906 inż. Janusz Rawicz Niedziałkowski określa zakres prac, które mają na celu obniżenie zawilgocenia murów klasztoru. Dodatkowo Niedziałkowski w swym opracowaniu określa stan budynku klasztornego jako fatalny, na co wpływ mają takie rzeczy jak przegniłe fundamenty oraz odpadające tynki.

Ponad pół wieku po gruntownej restauracji (1957-59) wykonanej wg. planów Hendla i Niedziałkowskiego wnętrze zespołu klasztornego zostało poddane restauracji. Prace polegały na konserwacji polichromii, prezbiterium oraz transeptu [1].

W tym też okresie dokonano przeglądu technicznego stwierdzającego zawilgocenie murów oraz konieczność częściowej wymiany więźby dachowej.

Lata 70 zapisały się w historii obiektu dużymi literami, gdyż właśnie wtedy dokonano dokładnej oceny stanu technicznego zarówno wyposażenia jak i konstrukcji klasztoru. Podkreślić należy, iż zabiegi te miały charakter mocno ingerujący w strukturę obiektu co, uznać można za odstępstwo od fundamentalnej zasady nieingerowania w obiekt zabytkowy.

4.3. Prace konserwatorskie – Etap przedprojektowy

Etap przedprojektowy obejmuje wszystkie działania mające na celu zdiagnozowanie przyczyn występujących uszkodzeń, począwszy od opisu opiniowanej zabudowy, poprzez pobranie próbek wraz z wykonaniem badań, a kończąc na sformułowaniu wniosków. W przypadku klasztoru O.O. Bernardynów badania mechanizmów zagrożenia murów zostały wykonane przez zespół (któremu przewodniczył dr inż. St. Karczmarczyk) [7]. W ramach niniejszego referatu (w zgodzie z jego tematyką) posłużono się wybranymi wynikami badań przeprowadzonych przez w/w zespół. Ściana zachodnia wieży wykazywała wysoki poziom zawilgocenia, osiagający wysokość do 230 cm ponad poziom terenu, natomiast na ścianie zachodniej transeptu poziom zawilgocenia osiagał wysokość 180 cm od poziomu terenu. Otrzymane wyniki, uwzględniając formy i skalę zagrożenia murów, wskazywały jednoznacznie na potrzebę niezwłocznego wykonania prac naprawczych, w których skład wchodzić powinno wykonanie izolacji poziomej ścian oraz tynków szerokoporowych (renowacyjnych) [7].

4.4. Stan istniejący

O prawidłowości wykonania prac konserwatorskich świadczy szereg czynników. O ile poprawa walorów użytkowych, dostrzegalna przez osoby przebywające stale lub czasowo w obiekcie jest pojęciem subiektywnym, zależnym od odbioru jednostek o tyle stan techniczny, związany z ewentualnym pogorszeniem estetyki, jest widoczny. Niezadowolający stan obiektów, pomimo uprzedniej naprawy, jest reakcją obiektu na zastosowanie wadliwych rozwiązań technologicznych.

Sytuacja, w której obecnie znajduje się kościół O.O. Bernardynów zdaje się być doskonałym na to przykładem. Pomimo wykonania szeregu prac mających na celu zabezpieczenie obiektu, sytuacja degradacji nie została powstrzymana. W październiku 2016 roku dokonano oględzin oraz wykonano badania stopnia zawilgocenia na podstawie, których stwierdzono szereg nieprawidłowości.

Pierwszym objawem niepożądanych reakcji, który przyciąga uwagę, jest znaczne pogorszenie walorów estetycznych obiektu. Biorąc jako przykład zachodnią ścianę wieży kościelnej, stan obecny nie różni się znacząco od stanu z roku 2001. Na elewacji widoczne są liczne przebarwienia, które próbowano maskować poprzez zamalowanie farbą. W przypadku stosowania farb o słabej dyfuzyjności takie postępowanie doprowadzi do dalszego pogorszenia stanu istniejącego, które objawiać będzie się poprzez łuszczenie farb i odpajanie tynków. Celem potwierdzenia złego stanu przegrody dokonano sprawdzenia zawilgocenia muru do wysokości ok. 150 cm. Pomiary wykazały zawilgocenie na poziomie 20% (zgodnie z obowiązującymi standardami mur o wilgotności powyżej 12% jest uznawany jako mokry). Taki stan rzeczy wskazuje jednoznacznie na zjawisko podciągania kapilarnego (podobnie jak w przypadku badań z roku 2001), które świadczy o wadliwie wykonanej izolacji poziomej przegrody (błędy wykonawcze lub błędne rozwiązania materiałowe).

Kolejnym punktem było zwrócenie uwagi na stan cokołu wykonanego z piaskowca. Doskonale widocznym jest zaplamienie sięgające $\frac{1}{4}$ wysokości, które spowodowane zostało najprawdopodobniej poprzez oddziaływanie wód rozbryzgowych. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest brak odpowiedniej impregnacji kamienia lub nieprzestrzeganie okresów kontrolnych. Warto pamiętać, że w przypadku zastosowania materiału hydrofobowego woda nie ma możliwości wnikięcia w głąb struktury zabezpieczonego materiału.

Zaistniała sytuacja ma miejsce na wszystkich sprawdzanych elewacjach kościoła, tj.: wschodniej, południowej i zachodniej. Na fotografiach nr 2a i 2b oraz zobrazowano stan istniejący. Na murach widoczne jest odchodzenie płatów farby, która – podobnie jak w przypadku wieży - jest efektem powtórnego nakładania kolejnych warstw. Badania poziomu zawilgocenia w tych miejscach również wskazywały na wadliwą izolację poziomą (zawilgocenie na poziomie 15%). Na fotografii nr 1 uwidoczniono szkodliwe działanie wód rozbryzgowych, które nadają cokołowi charakterystyczny zielony kolor. Brak odbarwień w rejonach rur spustowych świadczy o poprawnie wykonanej naprawie instalacji (rys. 2b).



Rys. 1. Zachodnia elewacja wieży, fot. autor, październik 2016

Fig. 1. West elevation of tower, fot. author, October 2016



a)



b)

Rys. 2. Degradacja elewacji, fot. autor, październik 2016

Fig. 2. Degradation of elevation, fot. author, October 2016

Widoczne na zdjęciach odspajanie farby oraz częściowe odspajanie tynków świadczy o destrukcyjnym działaniu soli budowlanych. W przypadku dużego zwilgocenia muru oraz występowania zasolenia powinna być przeprowadzona renowacja murów w sposób bardzo szczegółowy. W miejscu odspojenia tynków na elewacji południowo-wschodniej widoczny jest brak kompletnego systemu wykonania tynków renowacyjnych, stwierdzono częściowe zastosowanie tynków wapienno-cementowych. Uwaga ta zawarta została również we wnioskach opracowania wykonanego przez Politechnikę Krakowską. Zauważyć można pocienienie tynków (wierzchni tynk powinien mieć grubość minimum 2 cm, natomiast widoczny na fotografii 3 ma ok. 0,5 cm) oraz brak zastosowania tynków podkładowych (o grubości minimum 1 cm). Skutkiem pocienienia tynku jest brak skutecznej krystalizacji soli budowlanej w strukturach tynku renowacyjnego. Sole wraz z wilgocią z łatwością przedostają się do wierzchniej warstwy, niszcząc farbę i powodując odspajanie tynku.



Rys. 3. Odspojenie tynku, fot. autor, październik 2016

Fig. 3. Disconnection of plaster, fot author, October 2016

Na cokole kamiennym (część południowo-wschodnia) – rys. 4, występuje wysokie zawilgocenie oraz częściowe odspajanie kamienia na skutek braku impregnacji. Rzeczą wartą podkreślenia jest niewłaściwe ukierunkowanie spadków gzymsu nad cokołem (niewystarczające pochylenie), które doprowadzić może do zastoin wilgoci (deszcz, śnieg), a w konsekwencji do przyspieszenia procesów destrukcji materiału.

4.5. Wnioski

Rozpatrując istniejący stan rzeczy należałoby wykonać powtórny renowację obiektu, zgonie ze sztuką budowlaną i zastosowaniem materiałów posiadających



Rys. 4. Cokół kamienny, fot. autor, październik 2016

Fig. 4. Stone plinth, fot. author, October 2016

atesty (aprobatę organizacji Naukowo-Technicznej Grupy Roboczej ds. Utrzymania Budowli i Ochrony Zabytków (WTA)). Należy dokładnie określić poziom zawilgocenia murów, stopień zasolenia i wykonać opracowanie dokumentacji ponownej renowacji obiektu.

5. Kościół Najświętszej Maryi Panny

5.1. Powstanie kościoła

W XV w. dziedzic Stanisław Pilecki osadził w Zalesiu i okolicach Rusinów z prawosławnym popem. Następnie w wyniku Unii Brzeskiej parafia prawosławna ustanowiona została parafią greckokatolicką pod wezwaniem Wniebowzięcia NMP. W XX w., Kuria Biskupia w Przemyślu zmieniła opuszczoną po wojnie cerkiew w kościół filialny [10].

5.2. Praktyki konserwatorskie

Przeprowadzone kwerendy archiwalne potwierdzają wykonanie prac związanych ze zmianą wyposażenia wnętrza (1982 rok) oraz prac naprawczych polegających na naprawie tynków zewnętrznych (1991 rok). W latach 2000 do 2002 wykonano prace związane ze zmianą bryły kościoła (dobudowa zachrystii, kruchty oraz nadbudowa części bocznych). W roku 2016 wykonano prace mające na celu osuszenie murów kościoła. Polegały one na skuciu zasolonych i zawilgoconych tynków zewnętrznych, w miejsce których wykonano nowe tynki renowacyjne. Z cokołu kamiennego okalającego kościół skuto tynki cementowe celem jego osuszenia.

5.3. Stan istniejący

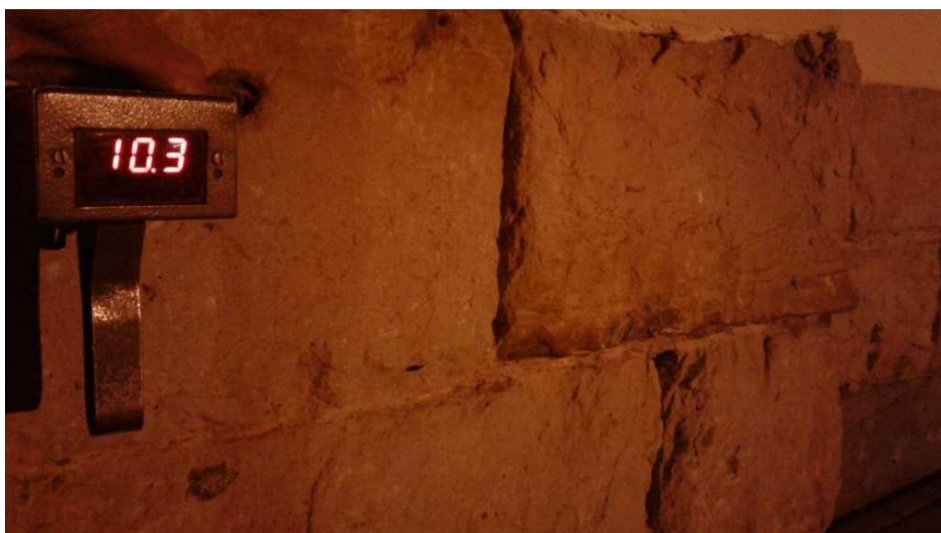
Po roku 1991 wymieniono tynki zewnętrzne, co jak widać na fotografii nr 5, nie zapobiegło dalszej degradacji obiektu [9, 10]. Taką sytuację tłumaczyć należy brakiem skutecznych izolacji poziomych i pionowych murów kościelnych.



Rys. 5. Elewacja frontowa, fot. Google Mapy, kwiecień 2016

Fig. 5. Front elevation, fot. Google Maps, April 2016

W grudniu 2016 roku wykonano badania stanu zawilgocenia (rys. 6) przegród zewnętrznych. Średni poziom zawilgocenia strefy cokołowej przekraczał wartość 10%. Stan taki kwalifikuje mur jako bardzo zawilgocony. Warty podkreślenia jest fakt, iż skucie tynku nie doprowadzi do osuszenia murów.



Rys. 6. Cokół kamienny, fot. autor, grudzień 2016

Fig. 6. Stone plinth, fot. author, December 2016

5.4. Wnioski

Brak wykonania należytych izolacji pionowych i poziomych doprowadzi do dalszej degradacji murów kościoła.

Zaleca się wykonanie izolacji pionowej zewnętrznej ścian fundamentowych celem powstrzymania naporu wód gruntowych. Dodatkowo wykonać należy izolację poziomą zewnętrznych ścian fundamentowych celem zlikwidowania podciągania kapilarnego. Na cokole kamiennym wykonać należy tynki renowacyjne. Zabieg ten spowoduje osuszenie cokołu i akumulację soli budowlanych.

6. Kamienica nr 2 przy ulicy płk. Leopolda Lisa-Kuli

6.1. Powstanie obiektu

Kamienica wybudowano w drugiej połowie XIX wieku. Budynek posiada 3 kondygnacje nadziemne oraz 1 podziemną. Obiekt zarządzany jest przez osobę prywatną [8].

6.2. Prace konserwatorskie – Etap wykonawczy

W skutek przeprowadzonej kwerendy archiwalnej zebrano znikomą dokumentację, na podstawie której określić można sposób wykonania przepony poziomej.

Z fotografii nr 7 wynika, iż iniekcja krystaliczna wykonana została niezgodnie ze sztuką budowlaną. Wskazuje na to brak wypełnienia otworów oraz zastosowanie materiałów niewiadomego pochodzenia. Warty podkreślenia jest



Rys. 7. Iniekcja, fot. autor, 2015

Fig. 7. Injection, fot. author, 2015

fakt, iż iniekcja została wykonana w cegle dziurawce co, ze względu na strukturę materiału, jest niezgodne z technologią, ponieważ injekt nie ma możliwości szczelnego wypełnienia przestrzeni wewnątrz muru.

6.3. Stan istniejący

W roku 2016 wykonano badania wilgotności murów (rys. 8), które wykazały zawilgocenie na poziomie ok. 20% co kwalifikuje mur jako mokry. Wykonana przepona pozioma, metodą iniekcji krystalicznej nie spełnia przewidywanych kryteriów, czego efektem jest odspajanie tynków spowodowane przez wysokie zawilgocenie murów oraz zasolenie murów. Tynk pokryty jest farbami akrylowymi, charakteryzującymi się brakiem dyfuzji, co jak widać na poniższym zdjęciu powoduje jej odspajanie.



Rys. 8. Tynk pokryty farbą akrylową, fot. autor, grudzień 2016

Fig. 8. Plaster covered with acrylic paint, fot. author, December 2016

6.4. Wnioski

Planując kolejny remont należy uwzględnić ponowne wykonanie przepony poziomej ścian, skuć zasolone i zawilgocone tynki do wysokości 80 cm poza poziom zniszczeń (wykonać je jako tynki renowacyjne). W przypadku malowania wykonać wyłącznie farbami krzemianowymi.

7. Podsumowanie

Analizując omówione przypadki oczywistym jest fakt, iż podstawowym zadaniem związanym z konserwacją obiektu zabytkowego powinno być zabezpieczenie przed oddziaływaniem wody i soli budowlanych. Jest to niemożliwe, jeśli nie zostanie przecięta więź przyczynowo – skutkowa. W tym celu nale-

ży wykonać izolacje wtórne ścian, które odetną dalszy dopływ wody do przegrody. Oczywiście jest zastosowanie tynków renowacyjnych, których zadaniem jest osuszenie muru (iniekcje należy wykonać jedynie atestowanym środkiem). W tym miejscu należy ponownie powołać się na Kartę Krakowską 2000, która uświadamia, iż za zaniedbanie płaci się podwójną cenę. Pierwszym wymiarem jest utrata dziedzictwa kulturowego, drugim ponoszenie kosztów kolejnych napraw cyklicznie pojawiających się uszkodzeń.

Literatura

- [1] M. Gosztyła, B. Jagieła, *Konserwacja zabytków architektury*, Rzeszów 2015.
- [2] M. Rogalska, *Sole budowlane*, Konferencja Naukowa, Lublin 2007.
- [3] M. Rokieli, *Hydroizolacje w budownictwie*, Warszawa 2006.
- [4] M. Trochonowicz, *Wilgoć w obiektach budowlanych*, Konferencja Naukowa, Lublin 2007.
- [5] *Karta Krakowska 2000*, Kraków 2002.
- [6] *Kroniki O.O. Bernardynów*, Kraków.
- [7] St. Karczmarczyk, B. Ciepela-Biernat, M. Mazur, *Badania mechanizmów zagrożenia murów klasztoru i kościoła O.O. Bernardynów w Rzeszowie przez wilgoć i sole rozpuszczalne*, Kraków 2001.
- [8] MZBiM.
- [9] www.google.maps.pl (dostęp: 15.12.2016 r.).
- [10] www.wnmp.rzeszow.pl (dostęp: 15.12.2016 r.).

PRELIMINARIES ABOVE THE STATE OF CONSERVATION PRACTISE IN RZESZOW

Summary

The article brings up the problems of the preservation of antique objects in the range of counteraction of the negative results of the transport of water within the wall. Often met occurrence is a destruction of outer wall in ground zone and in the higher parties. The most common reason of degradation are wrong solutions in the range of the reconstruction of perpendicular and horizontal wall insulation. Moreover degradation of wall may be caused by wrong plaster and acrylic paint. All of that brought attention on the systemic solutions and on methodology of old buildings preservation. The first object, which existing state was examined is monastery Of O.O. Bernardynow in Rzeszow. A WNMP Church is next referential object, placed in Rzeszów. The evaluation of existing state showed lacks of insulation and the low quality of product used in proces or conservation. Last of all the old building located by the street of plk. Leopold Lisa-Kuli was examined. The existing state of the tenement is pointing at wrong system solutions. Taking into consideration fact that shown objects are only an appointed percentage from the greater spectrum it is necessary to puzzle above the thought from the preamble Cracovia Card 2000. The idea of CC2000 is to remind that the care over the cultural legacy is society's duty. Sad thing is the fact of cutting down the cost connected with old buildings conservation. Additionally one should emphasize that striking gaps in documentation concern even objects with the architectural and cultural value.

Keywords: wather in the wall, vertical isolation, horisontal isolation, renovation plaster

Przesłano do redakcji: 13.02.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Zbigniew MOTYKA¹

SYSTEMS FOR SPATIAL AND PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS MAPPING OF ANTHROPOGENIC LANDSCAPE FORMS AND PLANTS FORMATIONS IN MINING AREAS WITH THE USE OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE LASER SENSING FROM LOW HEIGHT

Selected remote measuring systems were presented suitable for use on Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in order to provide data for mapping of spatial and physicochemical parameters of anthropogenic landscape forms, including sinkholes, landfills and plant formations around the urban industrial areas, especially burdened with heavy mining activity. Applications of UAV systems already used by GIG for needs of air pollution monitoring were mentioned. A photogrammetry for needs of mapping of the anthropogenic terrain changes were presented on examples of closed coal mine in Katowice for needs of land reclamation. Applications of photogrammetry from low altitudes for mapping of anthropogenic invasive alien plants formations were presented on an example of Giant hogweed in locations in the municipality of Piekary Śląskie and the municipality Łodygowice of Silesian Voivodeship. New UAV platform was proposed for the remote laser scanning of terrain from a low altitude, comprised of inertial system, 2D laser scanner, and system recorder. Examples of scans obtained using 2D laser scanner in the laboratory conditions were presented. The laser mining scanner with a self-propelled layout for underground applications was also presented for mapping results of underground anthropogenic activities, including applications of 2D scanners not only for mapping geometry of underground workings, but also the interior of test boreholes in a rock mass, as well as for depicting artificially produced fractures for the degassing of the rock mass. The test configuration and introductory results of measurements in external environment of the slope geometry using a laser scanner 2D were also presented.

Keywords: laser scanner, UAV, landslides, landfills, Heracleum

1. Introduction

Both for the urban industrial areas, especially heavy loaded with mining activities, whether in the case of the open pit mines or underground mining landfills and dumps of excavated materials, as well as for the agricultural areas, and

¹ Zbigniew Motyka, Główny Instytut Górnictwa (GIG), Zakład Akustyki Technicznej i Techniki Laserowej, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice, zmotyka@gig.eu

even the wastelands, everywhere the results of intentional (pits, landfills) or incidental (sinkholes, landslides) anthropogenic impacts on landscape forms are met, including also vegetation formations. Both intentional (crops and forests) and random (invasive plants and their formations).

In order to maintain a sustainable approach to anthropogenic landscape transformations associated with human economic activity, including restoring its close to natural values in all those places where such activities ceased (restoration of the landscape, the revitalization of nature), there is need of a detailed inventory (photo documentation, mapping, including spatial mapping) of such variable in time and space anthropogenic landscape forms and plants formations ([1]-[5]). In general, for a large-scale documentation there exist a number of methods of providing such the documentation, ranging from the usual photography from the ground and air, through the stereoscopic photogrammetric methods and the use of lidar laser techniques, to the satellite SAR and multispectral remote sensing. For example, in GIG the Risk Information Surface System for Upper Silesia areas of abandoned coal mines is being developed, combined the advantages of Google Earth with the still being updated datasets on such anthropogenic changing forms of topography [6]. General information about the formation of such areas with sinkholes and their future dynamics are possible to achieve on the basis of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) satellite maps. Proposed in this paper solutions meet the need for precision mapping and delivery characteristics of individual points on the general maps of these systems. Such formations can be precisely documented with the use of stereoscopic photogrammetric air techniques from a relatively low height or with the use of methods of terrestrial 3D laser scanning using stationary laser scanners [7].

Existing gap in the range of very precise measurements of such formations for a low altitude had been tried so far to be filled using such manned and unmanned platforms as balloon and dirigibles. The possibilities of similar applications there were also opened before the microlight sport. However, only recently, with the development of relatively low-cost and high-performance mobile unmanned, remotely controlled, flying platforms (drones), often referred as Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), this area went through an avalanche expansion of applications, from photogrammetry to the detection and analysis of air pollutants examined along the route of passage of such a platform.

The GIG is currently implementing a whole complex of similar projects, among others, the described here system for mapping of anthropogenic forms of the landscape and vegetable formations, using the method of laser-scanning from a mobile platform, from a low and ultra low altitude, assisted by, in parallel conducted, classical photogrammetry techniques, and a spatial orientation (inertial sensors) and location (GPS). This paper is the result of one of such currently conducted in GIG research projects, entitled: "The development of a remote laser system for determining the geometric parameters of landfills and mining dumps", GIG no 11311056-172. Such a system allows to specify detailed spatial

maps and determination of precise dimensions and volumes of landscape anthropogenic forms, such as landfills or mining heaps. In addition, such a system can be equipped with a specialized, depending on the area of application, systems for remote detection of gases. This will allow, for example, to determine the maps of methane emissions from different forms of anthropogenic-like landfills, coal pit mines and coal deep mine shafts, or from bio-waste processing systems [8]. It can also allow the identification and location of the self-heating areas of the mine dumps and coal landfills, where it is combined with increased emissions of this and other gases. As well as the location of the potential and developing outbreaks of fire on the basis of remote and direct (detected directly above the point) detection of fire gases. Another possible area of application combining both techniques (scanning photogrammetry and detection of trace amounts of vapors and gases) will be the location and mapping of areas where some invasive plants occur, e.g. from the family Heracleum, which are characterized by the emission of volatile furanocumarins.

2. Lidars and laser 2D and 3D scanners

For remote laser scanning of surface area lidars (Light Detection and Ranging) currently are used. They use impulse laser beam for scanning surrounding environment and measure the time of flight TOF (Time-of-Flight) of diffuse optical pulse. They can be used to determine the distance from 1 meter to several kilometers. To increase their range of application, very short pulses of laser NIR (Near Infrared Range) radiation are used.

The scanning LIDAR system collects data on the distances to the different points within the specified area using mirrors deflecting the beam. Most of them work in a similar way as 3D laser scanners, using the simultaneous rotation around its axis by 360 degrees. Much more accurate 2D and 3D laser scanners use in the measurement process the low power lasers of continuous operation with a modulated beam and phase measuring of a distance typical for a laser rangefinders. Due to their lower power of laser beam they allow to measure much smaller distances (up to several tens of meters). In difference from the LIDAR and the laser scanners 3D which are very expensive, their 2D laser scanners counterparts achieve very economically prices, on an order lower, which makes them an attractive alternative for measuring particularly the relatively small geometrical topography forms. Their apparent disadvantage is that they need to be extra tilt or move for obtaining effects comparable to 3D scanning. A sample solution will be discussed latter, however, which, by using independent spatial orientation system, provides the same satisfactory results, especially when using relatively low cost UAV for the scanning of the test area from a low altitude. The advantage of such solution is that (in particular while ensuring uniform air path way at a set altitude, which, in the case of currently available such airborne platforms, is not a hard task) that an uniform cloud of points is ob-

tained, based on data gained in a cylindrical (and not spherical) co-ordinates. It should be noted that some of the lidar systems (e.g., HDL-32E Lidar Sensor) having a limited range (e.g., 80-100 m), intended to co-operate with the UAV, achieve comparable accuracy (about 2 cm) [9].

In the agriculture and forestry lidars are already used to control formations of plants and crops. In addition, adequate filtering of the images (clouds of points) can often remove vegetation formations (for example, a canopy of the less dense vegetation cereals, forests and scattered shrubs and, e.g., Giant hogweed) to display the surface of the ground. It allows also to determine height and thus often also the nature of the vegetation. In the latter case, the particularly useful scans may be obtained from a low height, allowing not only to determine the height of plants, but in particular, even the recognition of certain species by imaging of the shape of particularly large-sized leaves. This may be of particular importance in the mapping of formations of such alien invasive plants, as, for example, some species of *Heracleum* of an anthropogenic origin in the specific area, which leaves reach sizes of the order of half a meter and more. This should also allow to distinguish them from similar sized leaves of other natural native species (e.g., some species of the Asteraceae family, such as white and common butterbur, *Petasites albus* and *Petasites hybridus*, which more oval leaves also achieve comparable sizes). Such plants should additionally be easily identifiable on the basis of parallel photogrammetric data.

3. The photogrammetry and remote laser system for determining the geometric parameters of mining landfills and dumps from a low height

Figure 1 presents a schematic diagram of the system for photogrammetry and remote laser determining of the geometric parameters of anthropogenic landscape forms and plants formations, based on 2D laser scanner co-working with an inertial sensor of orientation and position. The laser beam in the extreme positions 5 and 6 sweeps along line 7 the surface area during the UAV platform flight over it. In the case of periodic inspection of the same area, a series of natural or artificially introduced benchmarks 8 can be distinguished or distributed on it. Figure 2 collected the first three elements of the test equipment.

A set of tested three basic elements of the system for remote laser scanning of surface terrain area includes (from left to right on Figure 2): inertial system, laser scanner 2D, and a system recorder with 64 GB memory, running under Windows 10.

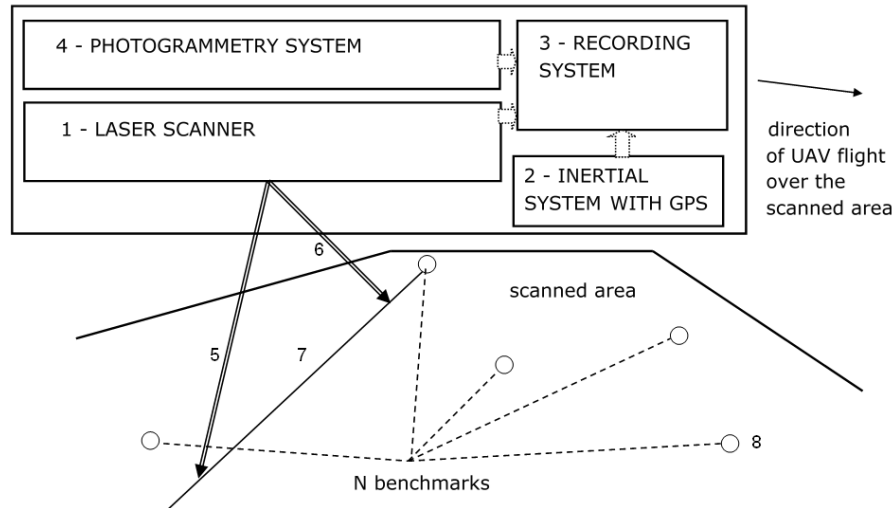


Fig. 1. System diagram of photogrammetry and remote laser for determining the geometry of the anthropogenic forms of land

Rys. 1. Schemat systemu fotogrametrii i zdalnego laserowego określania geometrii form antropogenicznych terenu



Fig. 2. A set of three basic elements tested of the remote laser scanning terrain system

Rys. 2. Zestaw testowanych trzech podstawowych elementów systemu zdalnego laserowego skanowania terenu

4. Photogrammetry from low height

To support the system of laser scanning (especially in the case of 2D laser scanners of lower resolution, which decreases proportionally with the altitude from less than 2 cm to almost 20 cm for changing distance of scanning from 1 m

to 10 m above the ground surface) the photogrammetry is useful for precision imaging of scanned formation for the needs of its specifications (of the surface type in the case of technical objects, and of the genera in the case of plant species).

Figure 3 presents UAV systems used in the GIG to photogrammetry of land from a low altitude and for remote control of other physico-chemical parameters of anthropogenic forms and formations.

Figure 4 presents a picture of land subjected reclamation of closed coal mine in a City of Katowice, and illustrates the removal of the temporary disposal of mineral wastes of the remediation process. This photo was made from an UAV platform, in October 2016, from a height of 60 m.



Fig. 3. UAV systems used by GIG

Rys. 3. Systemy UAV wykorzystywane w GIG



Fig. 4. Land reclamation at the terrain of closed coal mine in Katowice (photo by Tomasz Ko-mandera, GIG)

Rys. 4. Rekultywacja terenu zamkniętej kopalni węgla kamiennego w Katowicach (autor zdjęcia: Tomasz Komandera, GIG)

5. Anthropogenic formations of invasive plants on Abandoned Mine Lands

In addition to regular formations of agricultural crops and forests, to the anthropogenic impacts on a vegetation the introduction may be accounted of the invasive alien species of plants to the rural environments, which formations spread further in the environment in a partially random (by seeds dispersed randomly further by water, wind, humans and animals), and partly conditioned by their, usually not excessive, vegetation requirements.

Another illustrations (Fig. 5 and Fig. 6) demonstrate on an example of alien invasive plants from genus *Heraclea*, the deployment of such invasive anthropogenic formation of plant species on, also changed as a result of human activities, areas of the manifold of sinkholes being results of past mining, presently in the form of partially overgrown little ponds. Figure 5 shows a partially wooded area of uncultivated forest Kocie Górki in the Municipality Piekary Śląskie - wooded area of wasteland marked by numerous points of past mining activities, forming in many places overgrown with swamp plants vegetation sinkholes filled with water. On the north-eastern edge of the visualized area the adjacent Giant hogweed formations are spreading. The individual, identified locations of them were marked by position data obtained from the GPS system. These formations are particularly difficult to remove due to the fact that they adhere to an area of overgrown, partially flooded sinkholes (Figure 6a).

Figure 6b illustrates the on-going within the Municipality Łodygowice in the Silesian Voivodeship invasion of tight formations of these plants, brought there in the recent past to this area by a man, and presently penetrating freely the currently uncultivated areas, as well as the areas of traditional agricultural economy. Both the pictures were taken from a low height by a system UAV.

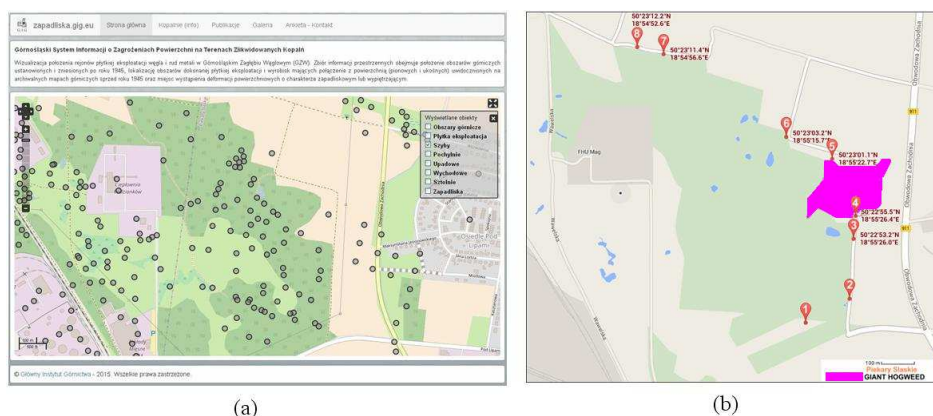


Fig. 5. Areas of past mining (a) with alien invasive anthropogenic vegetation formations (b)

Rys. 5. Tereny przeszłej eksploatacji górniczej (a) z obcymi inwazyjnymi antropogenicznymi formacjami roślinnymi (b)



Fig. 6. Difficult to remove formations of Giant hogweed in the Municipality Piekary Śląskie (a) and in the Municipality Łodygowice (b) in Silesia Voivodeship

Rys. 6. Trudne do usunięcia formacje barszczu olbrzymiego na terenie Gminy Piekary Śląskie (a) oraz Gminy Łodygowice (b) w Województwie Śląskim

6. Tests in laboratory scale of elements of the 2D laser scanning

Figures 7 - 11 illustrate tests in a laboratory scale and their results both on examples of laboratory facilities, as well as in ambient conditions for a little

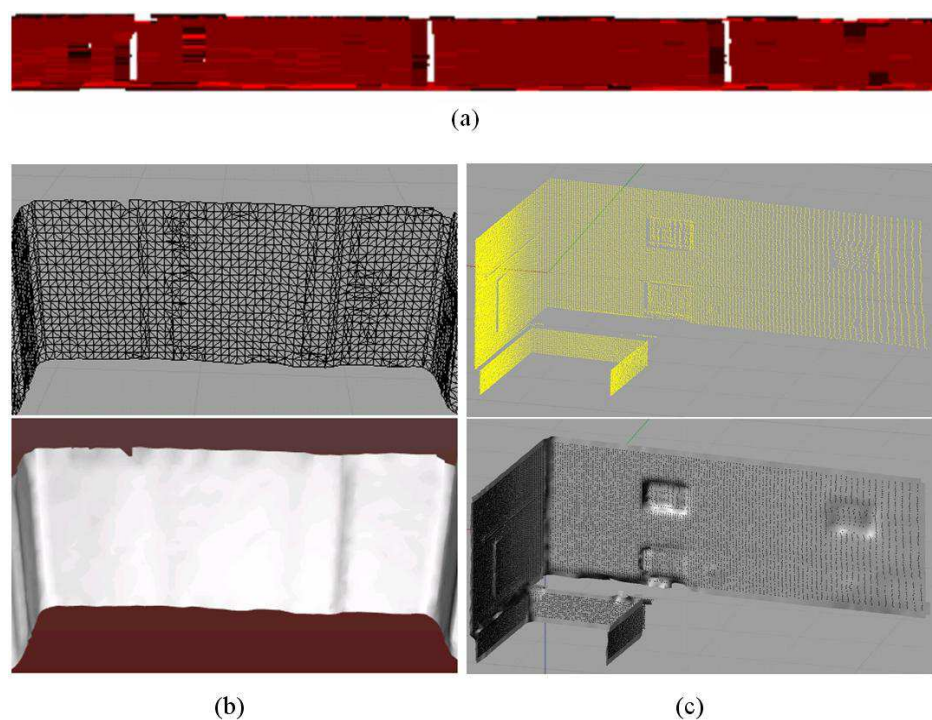


Fig. 7. Examples of scans obtained using 2D laser scanner in the laboratory conditions for the ceiling of the corridor (a) and (b), and laboratory facilities (c)

Rys. 7. Przykładowe skany uzyskane z wykorzystaniem skanera laserowego 2D w warunkach laboratoryjnych dla sufitu korytarza (a) i (b) oraz pomieszczenia laboratoryjnego (c)

slope. Figure 7 shows an example of scans as obtained by the 2D laser scanner in the laboratory conditions. Figure 7a illustrates the value of ceiling albedo for a long stretch of the corridor, Figure 7b presents 3D rendering of short section of the ceiling of the corridor, and Figure 7c shows the cloud of points and 3D rendering of the interior of a laboratory room.

In the absence of using the device to control the position of the scanner, it turns out that the key condition is the possibility of conserving an even movement of the head of scanning device. Figure 8c shows developed in the Laboratory of Laser Technology GIG patent solution, which enables the replacement of costly scanner 3D with a precision measurement system that uses 2D laser scanner, only, which additionally allows to obtain the same resolution along one horizontal axis of measurements, which makes it particularly useful for imaging, usually inaccessible from the air, forms of anthropogenic tunnels and mine workings ([10], [11]). Figure 8b shows an example of a single scan of a 2D interior of mining corridor obtained with the use of this system. A complete set of such scans can form the entire cloud of points allowing the precise imaging of geometry of the mine working.



Fig. 8. The laser mining scanner in a self-propelled layout (a) and a single transverse scan of the excavation (b)

Rys. 8. Górniczy skaner laserowy w układzie samojezdnym (a) i pojedynczy poprzeczny skan wyrobiska (b)

Figure 9 shows the 2D scan of the interior of the test borehole made in a coal rockmass, and depicts an artificial fracture created in it for degassing of the rockmass.

Figure 10 illustrates the measuring post during the scanning of geometry of the slope with the use of 2D laser scanner, in configuration for outside tests. Example results obtained in these tests using the external 2D laser scanner system were shown in Figure 11.

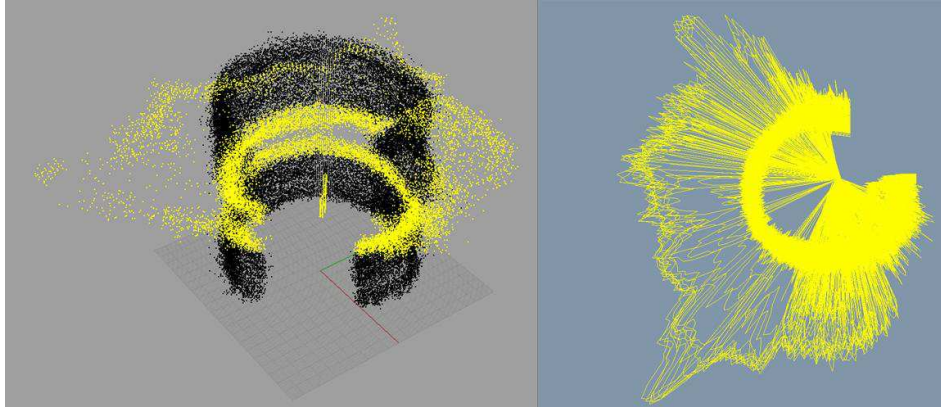


Fig. 9. 2D scan of the fracture in a rock mass obtained from the interior of test borehole

Rys. 9. Skan 2D szczeliny w caliznie górotworu wykonany z wnętrza otworu badawczego



Fig. 10. Measuring the slope geometry using a laser scanner 2D

Rys. 10. Skanowanie geometrii skarpy, z wykorzystaniem skanera laserowego 2D

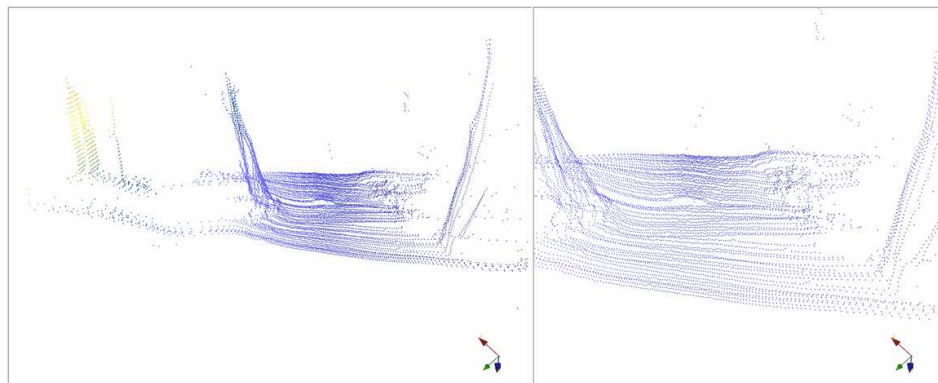


Fig. 11. An example of the results obtained for external testing of 2D laser scanner system

Rys. 11. Przykład wyników uzyskanych dla testów zewnętrznych systemu skanera laserowego 2D

7. Summary

A series of records for different anthropogenic forms, from dumps and landfills in the liquidated mines, to formations of invasive plants artificially introduced in a more or less intended way to areas of the former mining and agricultural areas were presented. The described above research were targeted on determining the usefulness of applying photogrammetry and 2D laser scanning methods from a small height with the use of UAV for needs of mapping and recognition of different types of anthropogenic geometrical objects and plant formations. This techniques proved their usefulness for the depicting of ground area derived from the UAV from the low height of up to 60 m for both the objects of geotechnical, as well as for the plant formations.

Thus the purposefulness of using two complementary modern research methods was confirmed: In addition to the In-SAR satellite interferometry, the UAV platform for low-altitude remote laser scanning, consisting of an inertial system, a 2D laser scanner, and a logger system. The application of both methods will certainly lead to a more accurate identification of surface deformations in the GZW.

For verification of an image, obtained while using multiple flights at longer intervals of time, it may be useful to apply a system of good visible from the air constant reference benchmarks. In conditions of the difficult geometry of the anthropogenic forms, requiring constant changes in UAV altitude of flight, it is necessary to use a parallel system of spatial orientation, such as on-board inertial sensors with GPS.

Literature

- [1] Kowalski A.: Deformacje powierzchni w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, Monography, GIG Editors, Katowice 2015.
- [2] Didier Ch., Merwe N., Betourney M., Mainz M., Kotyrba A., Aydan Ö., Jossien J.P., Song W.K.: Mine closure and post – mining management, International State of the Art. ISRM Mine Closure Commission Report (CD) 2008.
- [3] Kotyrba A.: Zagrożenie i ryzyko zapadliskowe terenów GZW. Wiadomości Górnicze, no 7-8, 2005, pp. 348-358.
- [4] Pilecki Z., Kotyrba A.: Problematyka rozpoznania deformacji nieciągłych dla potrzeb projektowania konstrukcji drogowych na terenach płytkiej eksploatacji rud metali. Materials Conference: Geologia i geofizyka w rozwiązywaniu problemów współczesnego górnictwa i terenów pogórnich. Prace naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, special edition no III, 2007, pp. 379-392.
- [5] Hamerla A., Pierzchała Ł.: Wpływ zagospodarowania doliny oraz warunków morfologicznych na roślinność w korycie, Inżynieria Ekologiczna (in prep.), 2016.
- [6] Kotyrba A., Frolik A., Siwek S.: Upper Silesian system of information about surface hazards on abandoned mining areas, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, no 10, 2016.

- [7] Szade A., Bartmański C., Ramowski A.: Using a 2D laser scanner in investigations of structures subjected to impact of static and dynamic effects, MAM (in prep.), 2016.
- [8] Motyka Z.: Systemy metanometrii optoelektronicznej dla górnictwa i środowiska, Wiadomości Górnicze, no 9, 2016, pp. 505-511.
- [9] 10 Top Lidar Sensors For UAVs And So Many Great Uses, <https://www.dronezon.com/>.
- [10] Smoła T., Motyka Z., Szade A., Ramowski A.: Jezdnia do przesuwania urządzenia pomiarowego podziemnego wyrobiska górniczego, BUP, vol. 1106, no 11, 2016, p. 37.
- [11] Passia H., Smoła T., Szade A., Ramowski A.: Profilowanie podziemnych wyrobisk w kopalniach węgla kamiennego z zastosowaniem skanerów laserowych 2D, Przegląd Górniczy, no 6, 2016, pp. 67-77.

SYSTEMY MAPOWANIA PARAMETRÓW PRZESTRZENNYCH I FIZYKOCHEMICZNYCH ANTROPOGENICZNYCH FORM KRAJOBRAZOWYCH I FORMACJI ROŚLINNYCH NA TERENACH GÓRNICZYCH Z WYKORZYSTANIEM FOTOGRAMETRII I TELEDETEKCJI LASEROWEJ Z NISKIEJ WYSOKOŚCI

Streszczenie

Omówiono wybrane zdalne systemy pomiarowe przydatne do wykorzystania na mobilnych bezzałogowych platformach latających, w celu dostarczania danych dla mapowania parametrów przestrzennych i fizykochemicznych antropogenicznych form krajobrazowych, w tym zapadlisk, wysypisk i formacji roślinnych wokół zurbanizowanych terenów przemysłowych, zwłaszcza obciążonych ciężką działalnością górnictwem. Wymienione zostały zastosowania systemów UAV wykorzystywane już przez GIG dla potrzeb monitoringu zanieczyszczenia powietrza. Wykorzystanie fotogrametrii dla potrzeb mapowania antropogenicznych zmian ukształtowania terenu zostało przedstawione na przykładzie poddawanej rekultywacji terenu zamkniętej kopalni w Katowicach. Zastosowania fotogrametrii od mapowania z niskich wysokości antropogenicznych formacji obcych roślin inwazyjnych zostały przedstawione na przykładzie barszczu olbrzymiego dla wybranych miejsc jego występowania w gminach Piekary Śląskie i Łodygowice, w Województwie Śląskim.

Została zaproponowana nowa platforma UAV do zdalnego laserowego skanowania terenu z niskiej wysokości, składająca się z układu inercyjnego, skanera laserowego 2D i układu rejestratora. Przedstawiono przykłady obrazów przestrzennych uzyskane za pomocą skanowania laserowego 2D w warunkach laboratoryjnych. Przedstawiono również skaner laserowy 2D do zastosowań górniczych w układzie samojezdnym do mapowania wyników podziemnych działań antropogenicznych, w tym zastosowań nie tylko do skanowania 2D geometrii wyrobisk podziemnych, ale również wnętrza otworów badawczych w górotworze, jak również do obrazowania przestrzennego sztucznie wytworzonych szczelin dla odgazowania górotworu. Przedstawiono również konfigurację testową oraz wstępne wyniki pomiarów w środowisku zewnętrznym geometrii skarpy przy użyciu skanera laserowego 2D.

Słowa kluczowe: skaner laserowy, UAV, zapadliska, składowiska odpadów, Heracleum

Przesłano do redakcji: 1.02.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Barbara TUROŃ¹
Dominika ZIAJA²
Bartosz MILLER³

WYKRYWANIE USZKODZEŃ WEZŁÓW RAMY STALOWEJ Z WYKORZYSTANIEM METODY CYFROWEJ KORELACJI OBRAZU

W artykule pokazano możliwość zastosowania metody wizyjnej, jaką jest metoda cyfrowej korelacji obrazów (ang. Digital Image Correlation, DIC), do identyfikacji uszkodzeń w konstrukcjach budowlanych na przykładzie stalowej ramy dwukondygnacyjnej. W tym celu przeprowadzono pomiary przemieszczeń metodą DIC na wybranym fragmencie ramy obciążonej dynamicznie, dla różnych wariantów uszkodzenia wprowadzanego w połączeniach dolnego rygla ze słupami. Przeanalizowano otrzymane wartości przemieszczeń. Wyniki przeprowadzonego eksperymentu wskazują na duży potencjał w zastosowaniu metody DIC, jako alternatywnej metody pomiarowej, pozwalającej pozyskać dane wykorzystywane np. do detekcji uszkodzeń konstrukcji. W pracy pokazano również możliwość zastosowanie prezentowanego systemu do pomiarów szybkozmiennych.

Słowa kluczowe: cyfrowa korelacja obrazu (DIC), metody wizyjne, pomiar bezkontaktowy, detekcja uszkodzeń, eksperymentalna analiza modalna

1. Wprowadzenie

Metody bezkontaktowe, w tym metody wizyjne, są coraz częściej stosowane w badaniach laboratoryjnych konstrukcji budowlanych. Tendencja taka wynika przede wszystkim z potrzeb praktycznych oraz z bardzo intensywnego w ostatnich latach rozwoju technologii informacyjnej, systemów komputerowych, elektroniki i urządzeń optycznych. Zastosowanie metod bezkontaktowych pozwala na uniknięcie problemów pojawiających się w badaniach tradycyjnymi metodami pomiarowymi, na przykład z mocowaniem czujników pomiarowych na konstrukcji. Eliminuje również bezpośredni wpływ aparatury na uzyskane

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Barbara Turoń, Politechnika Rzeszowska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651622; bturon@prz.edu.pl.

² Dominika Ziaja, Politechnika Rzeszowska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651618; dziaja@prz.edu.pl.

³ Bartosz Miller, Politechnika Rzeszowska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651623; bartosz.miller@prz.edu.pl.

wartości mierzonych wielkości, a także pozwala na wykonywanie pomiarów w trudnych warunkach np. na badanie elementów konstrukcji budowlanych, do których nie ma bezpośredniego dostępu albo jest on utrudniony. Metody bezkontaktowe pozwalają na znaczne uproszczenie procedury badawczej, skracają czas potrzebny na przygotowanie eksperymentu, jak również pozwalają na zautomatyzowanie analizy wyników. Wśród metod wizyjnych można wyróżnić metodę cyfrowej korelacji obrazu (ang. Digital Image Correlation, DIC), stosowaną do pomiarów przemieszczeń i odkształceń. Prezentowana w artykule metoda może również stać się alternatywą dla innej, dobrze znanej już bezkontaktowej metody pomiarowej, jaką jest wibrometria laserowa [1]. W przypadku wibrometru precyzyjny pomiar ruchu punktów w płaszczyźnie, na jakiej są one zlokalizowane, możliwy jest tylko przy korzystaniu z zestawu trzech głowic laserowych. Konieczność synchronizacji głowic oraz ilość niezbędnej aparatury znacząco komplikuje wykonanie pomiarów. Warto wspomnieć, że do zarejestrowania ruchu punktów metodą DIC wystarczy tylko jedna kamera. Inną ważną zaletą systemów DIC jest możliwość wykonywania pomiaru dla wielu punktów w dokładnie tym samym momencie. W trakcie badań z wykorzystaniem wibrometru laserowego w danej chwili można pomierzyć parametry wyłącznie jednego punktu.

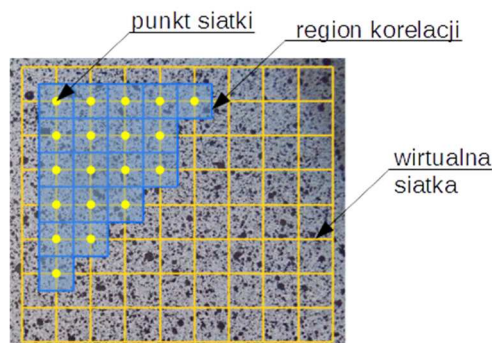
Sprawdzenie możliwości wykorzystania metody cyfrowej korelacji obrazu do detekcji uszkodzeń w konstrukcjach budowlanych daje szansę na rozwój nowych metod wykrywania uszkodzeń w konstrukcjach. Identyfikacja uszkodzeń jest bardzo ważnym zagadnieniem z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji (temat identyfikacji uszkodzeń podejmowany był w licznych pracach naukowych np. [2, 3, 4]), toteż w artykule podjęto próbę zastosowania DIC do detekcji uszkodzeń w węzłach ramy stalowej. W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych zrealizowanych w Katedrze Mechaniki Konstrukcji Politechniki Rzeszowskiej.

2. System cyfrowej korelacji obrazu

Cyfrowa korelacja obrazu jest jedną z metod pomiarowych opartych na systemach optyczno-elektronicznych. Umożliwia ona bezkontaktowy pomiar przemieszczeń i odkształceń poprzez korelację obrazów cyfrowych badanego obiektu zarejestrowanych podczas jego odkształcania się i/lub przemieszczania. Podstawowymi elementami systemu cyfrowej korelacji obrazu są kamery oraz komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem, które pozwala na rejestrację obrazów, ich analizę, wizualizację uzyskanych wyników oraz eksport danych [5, 6]. Pomiar przemieszczeń i odkształceń metodą DIC w zależności od liczby zastosowanych kamer może odbywać się na płaszczyźnie lub w przestrzeni trójwymiarowej. Dla próbek płaskich można stosować systemy z jedną kamerą, które umożliwiają tzw. dwuwymiarową cyfrową korelację obrazu, a więc pomiar w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny obrazu obserwowanego przez kamerę. W celu uzyskania wyników badań w przestrzeni trójwymiarowej konieczne

jest zastosowanie co najmniej dwóch kamer, które będą rejestrowały obiekt z dwóch różnych kierunków [7, 8].

Pomiar metodą DIC polega na wykonaniu zdjęcia badanego obiektu przed jego obciążeniem oraz zarejestrowaniu serii zdjęć po obciążeniu obiektu. Zarejestrowane obrazy są zapisywane i analizowane przez specjalistyczne oprogramowanie. Jeden z obrazów wybierany jest jako referencyjny (najczęściej jest to zdjęcie obiektu wykonane przed jego obciążeniem). Na obraz ten nakładana jest wirtualna, regularna siatka punktów. Każdy punkt siatki wyznacza środek kwadratowego regionu obrazu wielkości od kilkunastu do kilkudziesięciu pikseli. Wszystkie wyznaczone na referencyjnym obrazie regiony tworzą razem siatkę regionów korelacji (rys. 1) [6, 8]. Regiony te mają przyporządkowane współrzędne ich położenia w określonym układzie współrzędnych (może być to układ związany z kamerą, określony podczas kalibracji systemu na podstawie pierwszego zarejestrowanego zdjęcia tablicy kalibracyjnej lub układ zadany przez użytkownika systemu). Dzięki losowemu wzorowi punktów naniesionemu przed badaniem na powierzchnię badanego obiektu możliwe jest rejestrowanie i analizowanie zmiany kształtu i położenia poszczególnych regionów w trakcie obciążania obiektu. Oprogramowanie systemu DIC odnajduje pozycję każdego regionu korelacji z obrazu referencyjnego na wszystkich pozostałych zarejestrowanych obrazach. Dla każdego regionu obliczane są wektory przemieszczeń, a na ich podstawie wyznaczane są wartości odkształceń [6, 8].



Rys. 1. Wirtualna siatka punktów i regionów korelacji, na podstawie [6]

Fig. 1. Virtual grid of points and facets grid, based on [6]

Przykładem systemu pomiarowego, którego działanie opiera się na metodzie cyfrowej korelacji obrazu, jest system Q-450 firmy Dantec Dynamics. Podstawowe elementy systemu to dwie kamery cyfrowe, przenośny komputer z oprogramowaniem Istra 4D, urządzenie wyzwalająco-sterujące synchronizujące układ pomiarowy oraz tablice kalibracyjne. Pomiar przemieszczeń i odkształceń systemem Q-450 składa się z kilku etapów: przygotowania próbki do bada-

nia poprzez stworzenie na jej powierzchni losowego wzoru punktów, ustawienia stanowiska pomiarowego oraz skonfigurowania sprzętu, kalibracji układu z wykorzystaniem specjalnie do tego przeznaczonych tablic kalibracyjnych, pomiaru właściwego a więc rejestracji obrazów podczas obciążania obiektu, analizy zapisanych zdjęć opartej na korelacji oraz wizualizacji uzyskanych wyników [6].

System DIC Q-450 realizuje obliczenia za pomocą algorytmu korelacji w oparciu o pseudo-afiniczną transformację współrzędnych regionów korelacji wyznaczonych na obrazie referencyjnym badanego obiektu, z uwzględnieniem parametrów transformacji: translacji, rozciągnięcia, ścinania i dystorsji. Transformowane współrzędne można wyrazić wzorami [7, 8]:

$$x_t(a_0, a_1, a_2, a_3, x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy, \quad (1)$$

$$y_t(a_4, a_5, a_6, a_7, x, y) = a_4 + a_6x + a_5y + a_7xy, \quad (2)$$

gdzie: x, y – współrzędne przed transformacją,

x_t, y_t – współrzędne po transformacji,

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ – parametry transformacji (rys. 2).

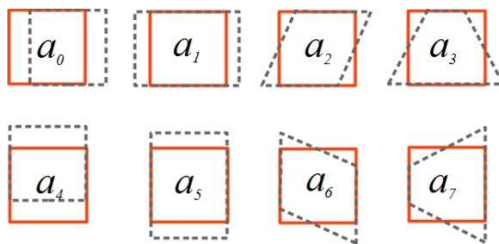
Parametry transformacji są tak dobierane, aby zminimalizować różnicę pomiędzy oryginalnym wzorem punktów $G(x,y)$, a zdeformowanym wzorem występującym na kolejnym analizowanym obrazie $G_t(x,y)$, z uwzględnieniem korekty fotogrametrycznej [7, 8]:

$$\min_{a_0, \dots, a_7, g_0, g_1} \sum_{x,y} \|G(x,y) - G_t(x,y)\|, \quad (3)$$

gdzie:

$$G_t(x,y) = g_0 + g_1G(x_t(x,y), y_t(x,y)), \quad (4)$$

g_0, g_1 – parametry oświetlenia.



Rys. 2. Parametry transformacji, na podstawie [6, 7]

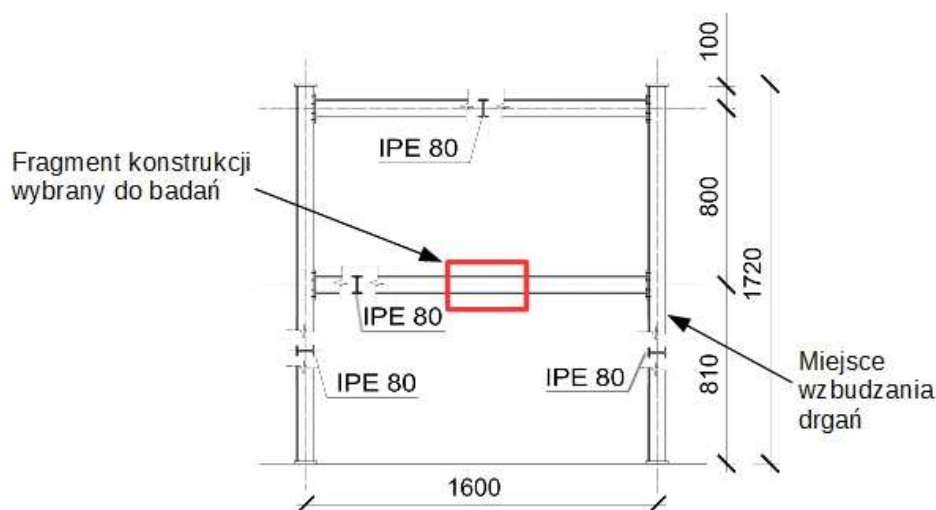
Fig. 2. Transformation parameters, based on [6, 7]

3. Badania laboratoryjne

Celem badań była identyfikacja uszkodzeń stalowej ramy w połączeniach rygla ramy ze słupem poprzez analizę przemieszczeń zarejestrowanych systemem cyfrowej korelacji obrazu dla wybranego fragmentu rygla ramy.

Badaniu poddana została dwukondygnacyjna rama portalowa wykonana z kształtowników stalowych o stałym przekroju identycznym dla rygli i słupów. Do budowy ramy zastosowano dwuteownik IPE 80 ze stali S355, długości elementów w osiach wynosiły 1,6 m (rys. 3). Połączenie rygla ze słupem wykonane zostało za pomocą 8 śrub M8 klasy 8.8.

Pomiary systemem cyfrowej korelacji obrazu wykonane zostały dla fragmentu rygla dolnego ramy. Wybrany do analizy obszar rygla miał wymiary $100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ i położony był centralnie względem osi symetrii ramy. Badany fragment konstrukcji przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Schemat ramy stalowej z zaznaczonym fragmentem wybranym do badań

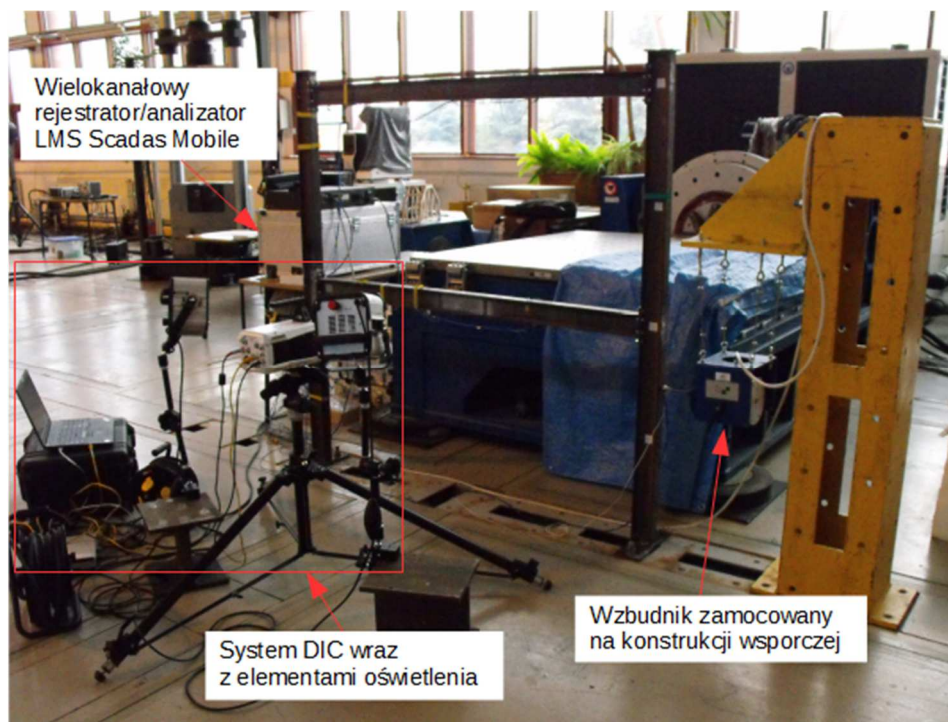
Fig. 3. Steel frame scheme with section selected for testing

Stanowisko pomiarowe do badań laboratoryjnych składało się ze wzбудnika firmy The Modal Shop, Inc. Model 2100E11, zamocowanego na dodatkowej konstrukcji wsporczej w sąsiedztwie ramy, wzmacniacza sygnału, wielokanałowego rejestratora/analizatora LMS Scadas Mobile, komputera pomiarowego z oprogramowaniem Siemens LMS Test.Lab 15 z modułem MIMO FRF Testing oraz z systemu cyfrowej korelacji obrazu Q-450 firmy Dantec Dynamics. Stanowisko laboratoryjne przygotowane do badań przedstawiono na rys. 4.

Wybrany do badań fragment rygla ramy stalowej został dokładnie oczyszczony. Następnie na jego powierzchnię nałożono białą farbę, tworząc w ten spo-

sób warstwę bazową, na której metodą natryskiwania naniesiono losowy wzór czarnych punktów. Systemem wizyjnym wykonano kilkukrotny pomiar przemieszczeń na powierzchni analizowanego fragmentu rygla ramy przy zastosowaniu jednej kamery, tzw. DIC-2D, dla różnych stanów ramy: I wariant – rama nieuszkodzona, II wariant – uszkodzone dwa węzły ramy tj. połączenie słup – dolny rygiel ramy z prawej i lewej strony, III wariant – uszkodzony jeden węzeł ramy tj. połączenie słup – dolny rygiel ramy z prawej strony, IV wariant – uszkodzony jeden węzeł ramy tj. połączenie słup – dolny rygiel ramy z lewej strony. W sytuacji bez uszkodzenia wszystkie łączniki, we wszystkich czterech połączeniach rygiel-słup, zostały dokręcone takim samym momentem.

Pomiar przemieszczeń na powierzchni wybranego do badań fragmentu ramy przeprowadzono podczas obciążenia dynamicznego. Drgania konstrukcji wzbudzano wymuszeniem harmonicznym (sinusoidalnym) o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości drgań swobodnych ramy tj. 106 Hz. Rejestracja obrazów przeprowadzona została w sposób ciągły przy częstotliwości nagrywania obrazów 2120 Hz (tj. 2120 zdjęć na sekundę).

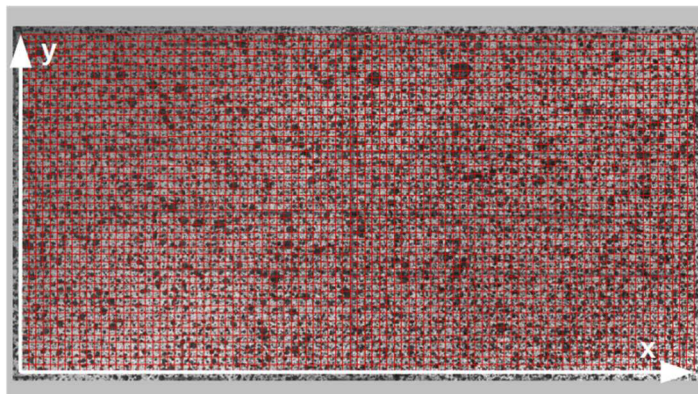


Rys. 4. Stanowisko pomiarowe

Fig. 4. Measurement set-up

4. Analiza wyników

System cyfrowej korelacji obrazu pozwolił na jednoczesny pomiar przemieszczeń 4371 punktów znajdujących się na powierzchni wybranego fragmentu rygła ramy (punkty te zostały automatycznie zdefiniowane przez oprogramowanie systemu DIC). W każdym punkcie uzyskano z pomiarów wartości przemieszczeń w dwóch kierunkach: x (wzdłuż osi poziomej rygła) i y (w kierunku prostopadłym do osi poziomej rygła) oraz wartość przemieszczenia całkowitego, dla ramy nieuszkodzonej oraz trzech różnych wariantów uszkodzenia ramy. Wirtualną siatkę punktów nałożoną na badaną powierzchnię rygła oraz układ osi xy pokazano na rys. 5.



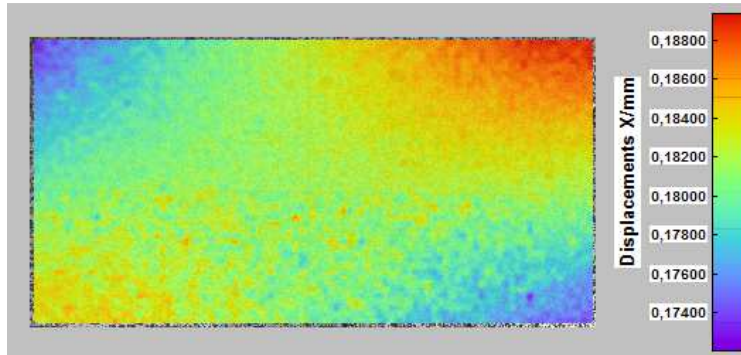
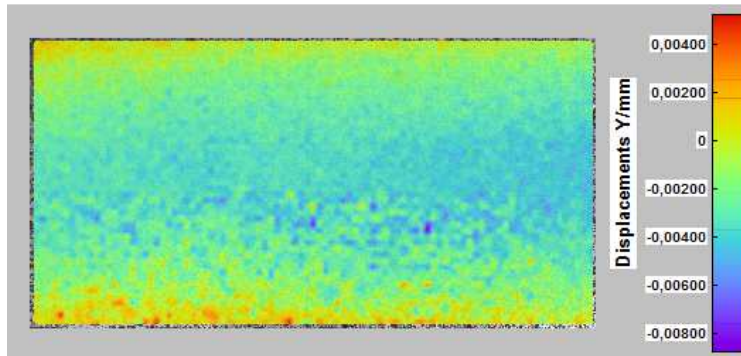
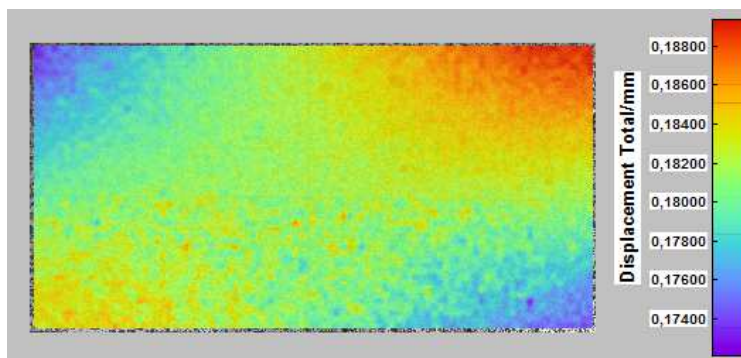
Rys. 5. Wirtualna siatka punktów oraz układ osi xy

Fig. 5. Points virtual grid and xy axes

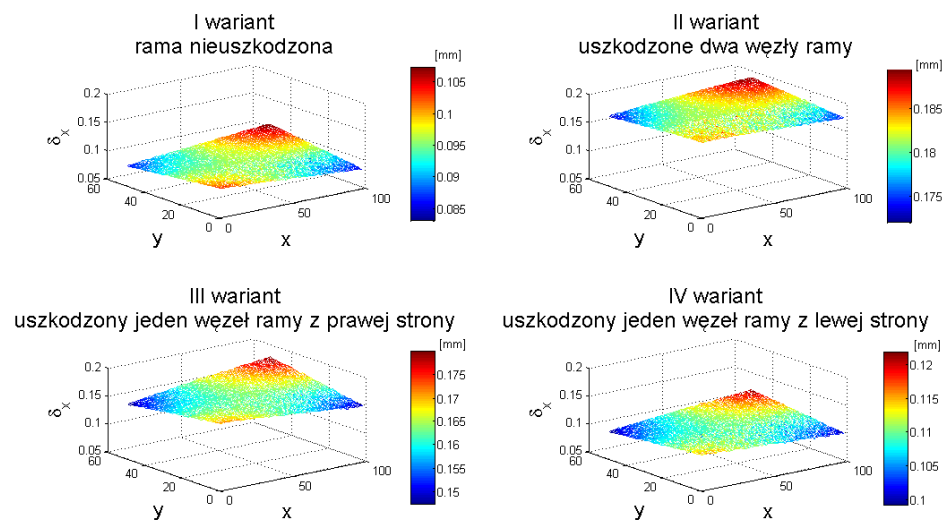
W programie Istra 4D, stanowiącym część systemu DIC Q-450, wygenerowane zostały kolorowe mapy przemieszczeń, pokazujące połowe rozkłady składowych przemieszczenia x i y oraz przemieszczenia całkowitego w czasie badania. Poszczególne mapy przedstawiają wartości przemieszczeń wszystkich punktów znajdujących się na badanej powierzchni rygła ramy w danej chwili. Mapy zostały stworzone dla każdej 0,00047 s badania tj. co 470 μ s. Każda chwila, w której zarejestrowano pojedynczy obraz rygła ramy, na podstawie którego uzyskano mapy przemieszczeń, nazwano dalej krokiem pomiarowym.

W programie Istra 4D dla każdej mapy określone zostały maksymalne, minimalne i średnie wartości przemieszczeń. Z pomiarów otrzymano również obrazy pokazujące przemieszczenia całkowite punktów badanej powierzchni za pomocą wektorów oraz poprzez deformację wirtualnej siatki nałożonej na powierzchnię analizowanego fragmentu rygła ramy.

Przykładowe mapy przemieszczeń pokazano na rys. 6, 7 oraz 8. Są to mapy dla II wariantu uszkodzenia ramy i kroku pomiarowego, w którym średnia wartość przemieszczenia na kierunku x na badanej powierzchni była maksymalna.

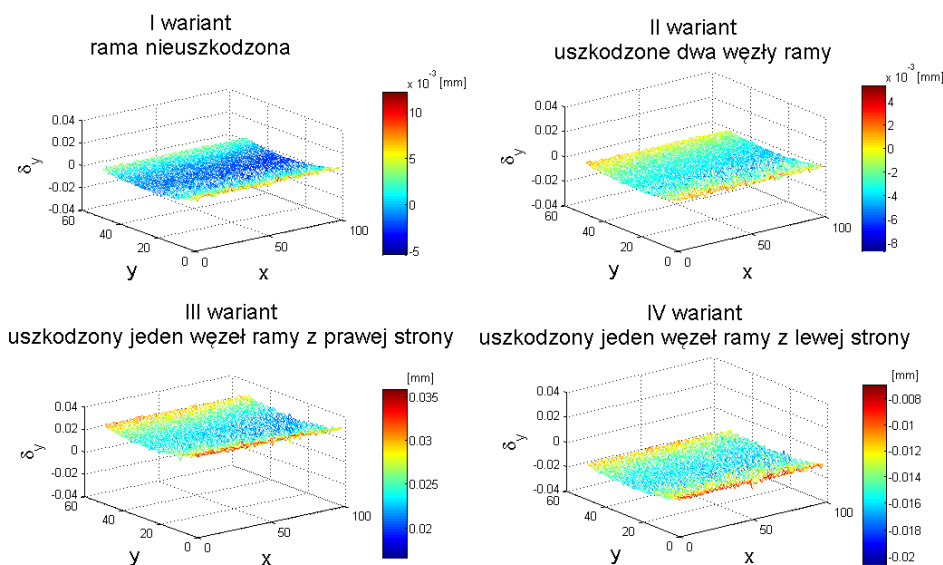
Rys. 6. Mapa przemieszczenia δ_x dla wariantu II uszkodzenia ramyFig. 6. δ_x displacement map for II damage variantRys. 7. Mapa przemieszczenia δ_y dla wariantu II uszkodzenia ramyFig. 7. δ_y displacement map for II damage variantRys. 8. Mapa przemieszczenia całkowitego δ dla wariantu II uszkodzenia ramyFig. 8. Total δ displacement map for II damage variant

W celu identyfikacji uszkodzenia ramy porównano mapy przemieszczeń w kierunku poziomym (δx) oraz w kierunku pionowym (δy) uzyskane na badanej powierzchni rygla dla czterech wariantów uszkodzenia. Analizę porównawczą przeprowadzono dla wybranych kroków pomiarowych, począwszy od kroku, w którym średnia wartość przemieszczenia całkowitego osiągała maksimum (krok ten w dalszej części artykułu będzie numerowany jako krok pierwszy). Na rys. 9 pokazano przykładowe wykresy przestrzenne przemieszczenia δx zarejestrowane systemem wizyjnym dla ramy nieuszkodzonej i trzech wariantów uszkodzenia, dla kroku pomiarowego nr 1. Z kolei rys. 10 przedstawia przykładowe wykresy przestrzenne przemieszczenia δy dla wszystkich czterech rozważanych stanów ramy, dla kroku pomiarowego nr 1. Na wykresach na osi pionowej zaznaczono wartości przemieszczenia odpowiednio na kierunku x dla wykresów z rys. 9 oraz na kierunku y dla wykresów z rys. 10 odpowiadające punktom analizowanego obszaru. Osie poziome opisują położenie punktów w prostokątnym układzie współrzędnych, którego początek znajduje się na przecięciu lewej oraz dolnej krawędzi analizowanego obszaru.



Rys. 9. Wykresy przestrzenne przemieszczenia δx dla wariantów I, II, III i IV, dla kroku pomiarowego nr 1

Fig. 9. Spatial plot of δx displacement for variants I, II, III and IV, for measurement step no 1

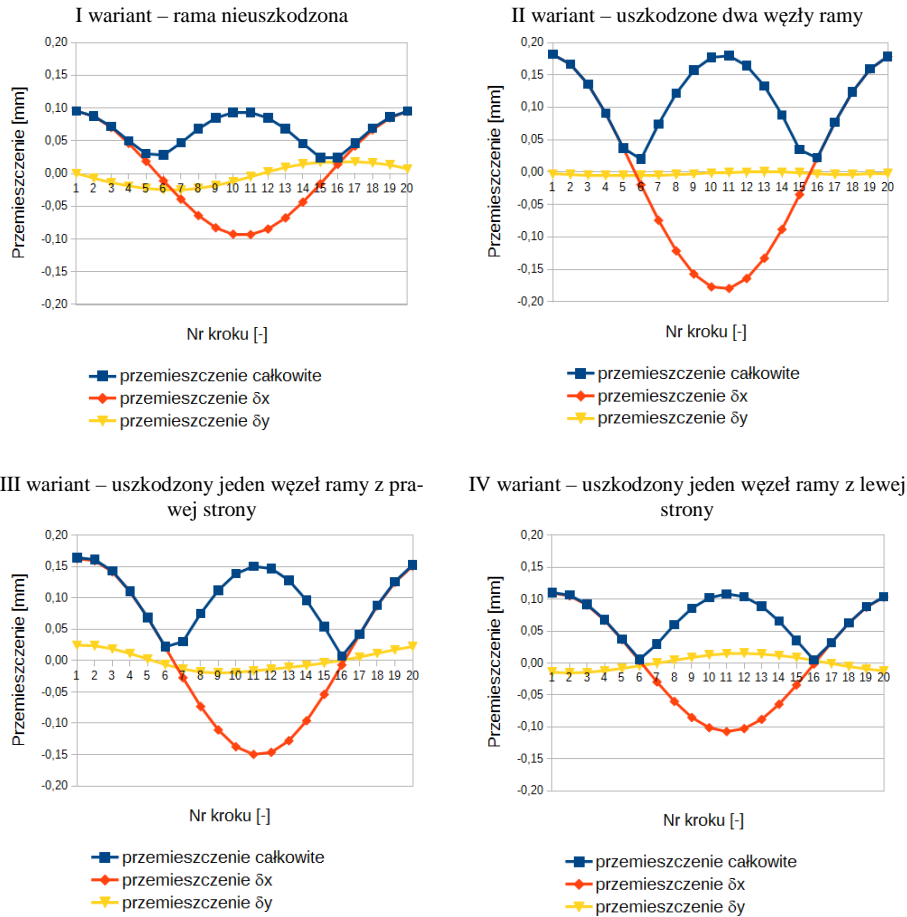


Rys. 10. Wykresy przestrzenne przemieszczenia δ_y dla wariantów I, II, III i IV, dla kroku pomiarowego nr 1

Fig. 10. Spatial plot of δ_y displacement for variants I, II, III and IV, for measurement step no 1

Przeprowadzono kilkukrotną analizę map przemieszczeń. Do pojedynczej analizy wybierano po 20 map (taka liczba map przypadła na czas wykonania jednego pełnego drgania rygla) przemieszczeń δ_x , przemieszczeń δ_y i przemieszczeń całkowitych δ dla czterech rozważanych stanów ramy. W programie Istra 4D dla każdego analizowanego kroku pomiarowego, od nr 1 do nr 20, odczytano wartości średnie przemieszczeń na badanej powierzchni. Krok nr 1 odpowiada chwili, w której średnia wartość przemieszczenia całkowitego na badanej powierzchni rygla jest maksymalna.

Na podstawie zależności występujących między wartościami średnimi przemieszczeń δ_x i δ_y można jednoznacznie określić rodzaj uszkodzenia ramy. Zależności te przedstawiono w postaci wykresów dla czterech wariantów na rys. 11. Na osi poziomej opisano numerami od 1 do 20 kolejne kroki pomiarowe, w których analizowano mapy przemieszczeń, a na osi pionowej przedstawiono średnie wartości przemieszczeń wyrażone w mm.



Rys. 11. Wykresy średnich wartości przemieszczeń na badanej powierzchni rygła dla 20 kolejnych kroków pomiarowych, dla wariantów I, II, III i IV

Fig. 11. Plots of mean displacement values on the study spandrel beam surface for 20 subsequent measurement steps, for variants I, II, III and IV

W przypadku ramy nieuszkodzonej (wariant I) dla dodatnich wartości przemieszczenia δx , przemieszczenia δy przyjmują wartości zarówno dodatnie jak i ujemne (analogicznie w przypadku ujemnych wartości przemieszczenia δx).

Dla ramy z dwoma uszkodzonymi węzłami (wariant II) średnie wartości przemieszczenia δy są zbliżone do zera.

W przypadku ramy z uszkodzonym węzłem z prawej strony (wariant III) zachodzi następująca zależność: przemieszczenia δy przyjmują wartości dodatnie dla dodatnich wartości przemieszczenia δx , przemieszczenia δy przyjmują wartości ujemne dla ujemnych wartości przemieszczenia δx .

Dla ramy z uszkodzonym węzłem z lewej strony (wariant IV) zachodzi natomiast zależność: przemieszczenia δ_y przyjmują wartości dodatnie dla ujemnych wartości przemieszczenia δ_x , przemieszczenia δ_y przyjmują wartości ujemne dla dodatnich wartości przemieszczenia δ_x .

Zależności te są powtarzalne dla wszystkich wykonanych pomiarów i każdego z 20 kroków pomiarowych wybranych do analizy i pozwalają nie tylko na wykrycie uszkodzenia ramy, ale również na identyfikację jego rodzaju.

Przedstawione powyżej związki między przemieszczeniami dla poszczególnych wariantów ramy są bardzo dobrze widoczne również na obrazach pokazujących przemieszczenia całkowite punktów badanej powierzchni poprzez zmianę położenia wirtualnej siatki punktów nałożonej na powierzchnię analizowanego fragmentu rygla. W tabeli 1 zestawiono obrazy wirtualnej siatki wygenerowane w programie Istra 4D dla czterech rozważanych stanów ramy oraz dla wybranych kroków pomiarowych (z 20 kroków przypadających na okres drgań rygla do zestawienia wybrano co trzeci).

Tabela 1. Porównanie przemieszczeń wirtualnej siatki punktów dla wariantów I, II, III, IV

Table 1. Comparison of displacements of virtual grid points for variants I, II, III, IV

Nr kroku	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IV
1				
4				
7				
10				
13				
16				
19				

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania ramy stalowej z wykorzystaniem systemu wizyjnego potwierdzają możliwość zastosowania metody cyfrowej korelacji obrazu jako alternatywnej metody pomiarowej w zadaniach związanych z drganiami konstrukcji budowlanych. Wykonanie serii zdjęć metodą DIC umożliwiło obserwację zmian położenia w czasie wszystkich punktów badanego obszaru jednocześnie. Z pomiarów systemem DIC uzyskano mapy przemieszczeń na kierunkach x i y oraz przemieszczeń całkowitych, a ich analiza pozwoliła na identyfikację rodzaju uszkodzenia ramy (symulowanego poprzez rozkręcenie węzłów). Na podstawie przeprowadzonych badań można zaobserwować, że odpowiedź konstrukcji nieuszkodzonej różni się od odpowiedzi konstrukcji uszkodzonej. Porównanie średnich wartości przemieszczeń δx i δy pomierzonych na badanym fragmencie rygla ramy w kolejnych krokach pomiarowych umożliwia ocenę, czy uszkodzenia ramy (w postaci rozkręcenia śrub w połączeniach słup-rygiel dolny) są symetryczne, czy niesymetryczne. Zależności opisane w pracy dotyczą jednak tylko analizowanej ramy (układu symetrycznego) i wymagają dalszych badań, np. niezbędne jest przeprowadzenie pomiarów przy wymuszeniu bliskim innej częstotliwości rezonansowej oraz poza częstotliwościami rezonansowymi. Możliwość obserwacji przemieszczeń na całej powierzchni badanego obszaru może być ogromną zaletą w bardziej skomplikowanych przypadkach uszkodzeń.

Literatura

- [1] Ehrhardt D.A., Allen M.S., Yang S., Bebernis T.J.: Full-field linear and nonlinear measurements using Continuous-Scan Laser Doppler Vibrometry and high speed Three-Dimensional Digital Image Correlation, Mechanical Systems and Signal Processing, 86, 2017, s. 82-97.
- [2] Nazarko P., Ziemiański L.: Wykrywanie uszkodzeń konstrukcji z wykorzystaniem fal sprężystych oraz sztucznych sieci neuronowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika, z. 74 (258), 2008, s. 271-282.
- [3] Kowalczyk P., Nowosielska K.: Analiza możliwości wykrywania uszkodzeń konstrukcji za pomocą technik światłowodowych, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 6 (201), 2009, s. 87-96.
- [4] Kokot S., Zembaty Z.: Wykrywanie i lokalizacja uszkodzeń w konstrukcjach budowlanych za pomocą drgań i analiz numerycznych, Inżynieria i Budownictwo, R. 62, nr 4, 2006, s. 215-218.
- [5] Frankovský P., Virgala I., Hudák P., Kostka J.: The use of the digital image correlation in a strain analysis, Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, vol. 18, no. 4, 2013, pp. 1283-1292.
- [6] Instrukcja obsługi systemu Q-450: Q-450 SYSTEM Operation Manual, Dantec Dynamics, 2013.
- [7] Hagara M., Huňady R., Lengvarský P., Bocko J.: Numerical Verification of a Full-field Deformation Analysis of a Specimen Loaded by Combined Loading, American Journal of Mechanical Engineering, vol. 2, no. 7, 2014, pp. 307-311.

- [8] Trebuña F., Huňady R., Bobovský Z., Hagara M.: Results and Experiences from the Application of Digital Image Correlation in Operational Modal Analysis, Acta Polytechnica Hungarica, 2013, vol. 10, no. 5, pp. 159-174.

DETECTION OF DAMAGE IN STEEL FRAME JOINTS BY MEANS OF THE DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD

S u m m a r y

The paper presents the possibilities of applying the visual measurements (namely Digital Image Correlation method, DIC) in the damage identification of building structures on the example of a two-storey steel frame. For this purpose, displacement measurements were carried out on a selected fragment of the steel frame subjected to a dynamic load, for the various variants of the damage introduced in the column – lower spandrel beam joints of the frame. The obtained displacement values were analyzed. The results of this experiment indicate a high potential of the DIC application as an alternative measurement method, which allows to obtain data used for instance in the damage detection. The paper also shows the possibilities of applying the presented system for fast-change measurements.

Keywords: digital image correlation (DIC), visual methods, non-contact measurement, damage detection, experimental modal analysis

Przesłano do redakcji: 06.06.2017 r

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Dawid MROZEK¹
Magdalena MROZEK²
Jan FEDOROWICZ³

ANALYSIS OF AN EFFECTIVENESS OF EXPANSION JOINTS IN THE MULTI-FAMILY BUILDING LOADED BY MINING ACTIVITIES

There are a lot of possibilities to protect the existing building against the negative impact arising from conducted or projected mining exploitation. These additional loads on the mining area are dependent, among others, from the effects on the surface from an exploitation of coal. One of the basic methods of protection of a building is to carry out the distribution of an object into smaller and regular in a horizontal section parts, what is called dilatation. In consequence of this treatment the decrease of the effort of supporting elements, additional loaded by mining impacts, is expected. The problem is realization of a proper and efficient dilatation in a complicated plan of an existing building.

The paper contains the results of numerical analyzes of a model of a multi-family building with a large and irregular horizontal projection, where two systems of expansion joints were used. The results were compared to the results of the analysis of a model without taking into account additional building protection. The different solutions of the analyzes, where the different directions of mining were included, are presented. The distribution of forces in the bearing walls of the building was analyzed.

Keywords: mining influence, ground deformation, building protection, FEM, numerical analyzes

1. Introduction

An extremely densely-populated area of Upper Silesia is constantly exposed to impacts resulting from operation related to underground mining of hard coal deposits. As a result of said operation we may observe, inter alia, a constant deformation of land surface. The determination of the rate of such deformation is

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Dawid Mrozek, Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel. 32 2372118; dawid.mrozek@polsl.pl

² Magdalena Mrozek, Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel. 32 2372118; dawid.mrozek@polsl.pl

³ Jan Fedorowicz, WST Katowice, ul. Rolna 44, 40-555 Katowice; tel. 32 237 22 68; jankfedorowicz@gmail.com

a complex issue, still essential from the point of view of ensuring safety of a building structure. Having known the expected impact of mining areas we are able to assume, as early as at the stage of building structure design, an adequate method and level of protecting the structure. A range of possible solutions will be reduced in the case of an existing building structure which is not resistant to impacts caused by continuous deformation of mining area. One of the methods to reduce the internal forces resulting from additional mining impact on a building is the division of its horizontal projection into regular parts. Such procedure consists in implementing an adequate expansion joint with minimum alterations of the utility functions of the building structure. Execution of expansion joints in an existing building is complex and costly in technical terms and additionally burdened with a significant role of residents' emotions being involved. Having regard to the aforementioned, a profound analysis of the effective selection of expansion joints system is justified. Our studies are conducted on actual multi-family residential building with computer-based numerical method being applied.

2. Characteristics of the structure and geological-mining conditions

2.1. Overview of the structure of the building under the study

The subject of the analysis is a load-bearing structure of the detached three-staircase residential building built with a use of traditional method and having different heights. From administrative point of view the building structure is

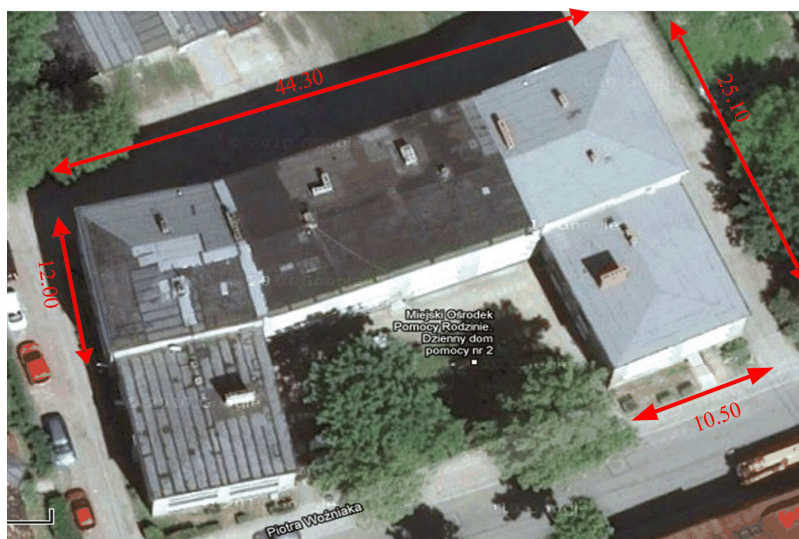


Fig. 1. View of the object

Rys. 1. Widok obiektu

composed of three buildings the horizontal projection of which is C-shaped. The building structure is founded on one level (all three buildings) with a complete basement (Fig. 1). The particular features of the structure are as follows:

- load bearing system – predominantly longitudinal,
- total length of the building (length of C letter) $L=43.30\text{ m}$,
- total height of the building (measured from the foundation footing) approx. $H=17.90\text{ m}$ in central part and $H=13.80\text{ m}$ in side parts,
- total broadness of the building $B=24.40\text{ m}$ and 10.85 m .
- foundations – made of concrete, on which widened brick masonry walls $60\text{-}104\text{ cm}$ wide and $40\text{-}60\text{ cm}$ high rest,
- load bearing walls of the building made of solid bricks:
 - external and internal walls of basement and first storey being 51 cm thick,
 - external and internal walls of higher storeys made of bricks being 38 cm thick,
- the ceiling over the basement storey - ceiling *DMS*,
- wooden ceilings over the higher storeys,
- reinforced concrete lintels, prefabricated,
- reinforced concrete stairs, slab-type, double staircase.

2.2. Overview of the foundation soil as well as geological-mining conditions in the area of founding of the building under the study

In the area of the location of the building under the study the geological structure is composed of Quaternary and Triassic layers. The Quaternary layers are composed of boulder clays and sandy deposits whereas Triassic is represented by dolomites and marlstone and limestone deposits. The coal measures are represented by Ruda, saddle and marginal layers. The coal seams are deposited in regular layers with 11° south-west saddle. Mining in this area was carried out in early 20th century in a number of Ruda series layers and saddle layers deposits. The final mining of hard coal deposits took place in April, 2015.

The building structure under the study has been and still is impacted by the damage of the structure which cause hindrance in regular operation of the building and which deteriorate its current technical condition. Therefore, materials from our archives which are related to the nearest neighbourhood of the building under the study have been used in this document as well as all records concerning the consequences of mining operations carried out in recent years. Below is presented selected information concerning the consequences of mining in the area under the study in which the building concerned is located as well as supplementary information on ore excavations. Table 1 presents characteristics of selected layers.

Table 1. The main characteristics of exploited decks

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki eksploatowanych pokładów

Deck	Distance from the building [m]	Years	Deep [m]	Thickens of the deck [m]	Expl. coef. α
Done Exploitation					
410/1z2	105	1932	380	2,2	(0,8)
414/2	200	1955	485	2,0	(0,8)
416/1z2	230	1964	520	2,3	(0,8)
417	0	1967	535	2,0	(0,2)
418	0	1970	560	2,3	(0,2)
419	0	1977	570	2,3	(0,2)
501/1	240-290	1976-1977	540-580	2,3	(0,2)
507	0	1982	720	3,2	(0,5)
414/3	245	1986	520	2,0	(0,2)
507 WD	0	1987	720	2,3	(0,2)
504 WD	0	1988-1989	660	2,4	(0,2)
507 WG	130	1989	710	1,8	(0,8)
414/1	0	1995	475	2,8	(0,2)
419	295	1999-2000	480	2,75	(0,2)
510 WG	210	2001	710	1,9	(0,7)
504 WG	180	2003	650	3,0	(0,8)
510 WD	265	2005-2006	695	3,0	(0,2)
510 WD	100	2007	705	2,8	(0,2)
510 WD	140	2011	710	2,4	(0,2)
620	440	2014	945	1,8	(0,8)
Design Exploitation					
510 WD	155	2013-2017	750	2,4	(0,2)
510 WS	155	after 2020	745	2,8	(0,2)
615	440	2016	895	1,8	(0,8)
510 WG	155	after 2025	745	2,8	(0,2)
414/2	0	after 2030	565	3,0	(0,2)

The geological-mining opinion said that the basic indicators which characterize the deformation of the area surface in relation to post-mining are $\varepsilon_{max}=2.9 \text{ mm/m}$, $T=2,6 \text{ mm/m}$ and $R_{min}=-27.0 \text{ km}$, $w=260 \text{ mm}$. In the case of projected mining until 2030 the most likely total impacts of mining will be characterized by indicators equal to $\varepsilon_{max}=1.4 \text{ mm/m}$, $T=3.3 \text{ mm/m}$, $w=933 \text{ mm}$ respectively and fall within group II of mining area category. The opinion also said that the area under consideration was located within the reach of mining tremors caused by operation of the coal mine. Below is listed a record of mining tremors which took place between 2010 and 2013 and the energy of which exceeded $1 \cdot 10^5 \text{ J}$ plus maximum likely amplitude of acceleration estimated under empirical relationships. The information contained therein lead to the conclusion that in the period under the study several dozen mining tremors the acceleration amplitude of which might have exceeded the value of 150 mm/s^2 , took place so it might have exceeded, according to [1, 2, 3, 4] the limit of minor arduousness. The parameters of mining tremors have been listed in Table 2.

Table 2. The tabulated summary of selected recorded impacts during the 2010÷2013, w przypadku których oszacowano przyspieszenie o wartości powyżej 150 mm/s^2

Tabela 2. Zestawienie wybranych zarejestrowanych wstrząsów w okresie 2010÷2013 years, where the value of the resultant acceleration was estimated in excess of 150 mm/s^2

No.	Data	Time	X	Y	Energy [J]	Deck	Acceleration [mm/s^2]
1	2010-01-07	21:32:21	5000	-3400	2,00E+07	620	158,0
2	2010-01-22	20:23:11	5130	-3170	4,00E+07	620	358,0
4	2010-05-11	13:42:37	5370	-3370	9,00E+06	620	399,7
5	2010-07-30	15:36:37	5000	-3470	8,00E+06	620	300,8
11	2010-09-16	05:37:43	4850	-3470	2,00E+07	620	617,0
13	2010-10-01	16:49:17	4900	-3500	9,00E+05	620	273,0
15	2010-10-09	03:48:21	4870	-3530	4,00E+06	620	711,0
16	2010-10-13	11:01:29	4860	-3520	3,00E+06	620	464,0
17	2010-10-15	12:39:54	4930	-3710	5,00E+06	620	394,0
23	2011-01-11	23:44:17	4930	-3580	8,00E+07	620	174,1
25	2011-06-03	19:49:33	5800	-3460	3,00E+06	510	269,9
26	2011-06-29	17:56:53	5790	-3450	3,00E+06	510	208,2
28	2011-07-19	18:06:39	5830	-3500	8,00E+06	510	311,6
29	2011-09-09	18:08:03	5860	-3520	5,00E+06	510	301,0
30	2011-09-19	17:47:08	5840	-3540	4,00E+06	510	209,1
31	2011-10-08	3:30:06	5850	-3580	2,00E+06	510	220,9
33	2012-09-27	18:11:16	5100	-3220	2,00E+07	615	301,8
34	2012-10-02	12:43:20	5290	-3230	9,00E+06	615	195,2
36	2012-11-21	5:22:35	5390	-3430	6,00E+07	615	310,4
38	2013-01-14	14:44:17	5500	-3340	5,00E+06	615	178,7

3. The system of expansion joints of the building including numerical equivalents

The determination of the most efficient division of the building structure with expansion joints being applied was preceded by an analysis of the results acquired in the course of numerical calculations with a use of the finite element method (*FEM*) [6, 7, 8]. The method provides for the creation of credible models of the building with the following being considered: structural components [5], loads (including mining loads) and expansion joints (as a modification of contact between the walls).

3.1. Expansion joints adopted

The implementation of an expansion joint is aimed at reducing internal forces caused by inter alia impacts of mining origin. The areas with mining op-

eration in progress need specific principles of shaping the joints [1, 2, 3, 4]. The building under the study has a clear "C" letter shape in horizontal projection. Considering the difference in the heights of building wings and its central part a division of the building structure into three parts has been proposed (Fig. 2b). Such operation results in the emergence of one structure with a prolonged projection and two smaller ones. The solution may be modified by dividing the building structure into four parts (Fig. 2d), executed as a result of supplementary (as compared to "B" option) division of the central part into two parts. As in administrative terms the building structure is composed of three buildings one suggested division options includes the layout which reflects such situation (Fig. 2c). The result of "C" option will be the reduction of the central segment length. Seeking the opportunity to compare the work of structures of the expansion joints systems being presented "A" model free of protections (the absence of expansion joints - Fig. 2a) has also been studied. Application of traditional Budzianowski's approach led to the conclusion that the building structure with no expansion joints does not have II category of resistance; hence reinforcement and modernization actions are required.

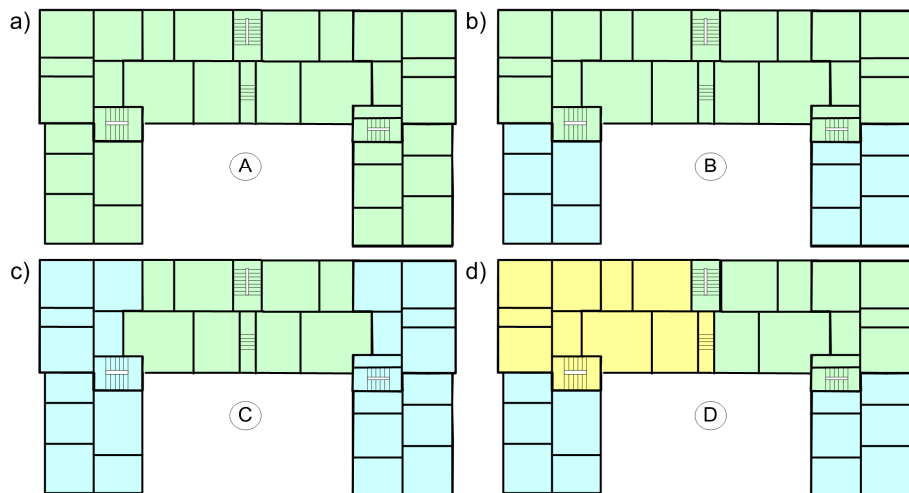


Fig. 2. Expansion joints adopted

Rys. 2. Zastosowany układ dylatacji

The systems of expansion joints as referred herein do not cater for all possibilities of their application in the building under the study. However; every time expansion joints require to be formed at the entire height of the building structure as well as a load bearing wall to be erected to form the completion of the part being expanded by joints.

3.2. Description of numerical model being applied

Numerical models of the building have been made with actual dimensions of the structure being maintained and with a use of *FEM* [5, 6, 7, 8]. The models include window and door openings in the load bearing walls of the building. The models consider direct foundation on the soil described under the vertical modulus of subgrade reaction according to [1, 2] as $C_0=20 \text{ MN/m}^3$. The load bearing walls with various thickness have been described as masonry walls made of bricks with lime-cement mortar. The ceiling above the basement has been modelled as concrete slab with the ceilings made of wood. The work of materials considered in the model is described by linear-elastic relationship. Details concerning material parameters adopted for calculations are contained in Table 3. The building models being applied did not include the structure of wooden roof due to its low stiffness as compared to wall components. The load per roof structure was juxtaposed ($q_{\text{roof}}=4.7 \text{ kN/m}^2$) and brought to linear load of external walls of the building structure. The calculations considered variable loads applied on ceilings.

Table 3. Tabulated summary of material parameters adopted in the calculation

Tabela 3. Zestawienie parametrów materiałowych przyjmowanych w obliczeniach

Material	ρ [kg/m^3]	E [GPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	ν
Masonry	1900	2,1	2,1	0,4	0,20
Concrete	2400	30	16	1,6	0,16

Numerical analyses have been conducted with a use of *FEM* with a division into finite elements (*FE*) of the structural part into 4-node square shell elements with a side equal to approx. 10 cm (Fig. 3b). The division resulted in approx. 170 000 *FE* to which adequate material and geometrical parameters were attributed. The expansion joint has been considered by appropriate modelling of segments (Fig. 3a), followed by application of unilateral ties providing for the transfer of compression forces between parts.

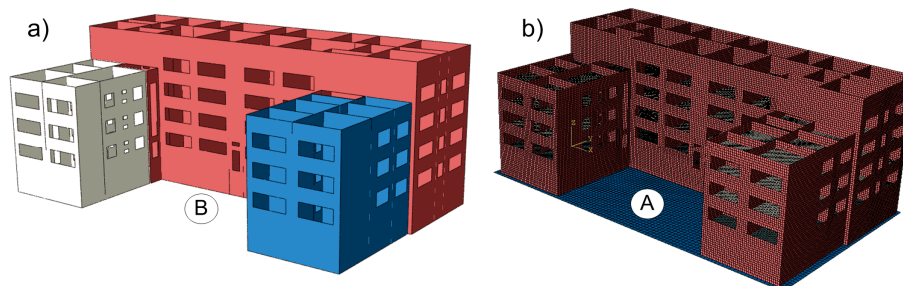


Fig. 3. Numerical model of the object: a) division into parts, b) FEM mesh

Rys. 3. Model numeryczny obiektu: a) podział na części, b) siatka MES

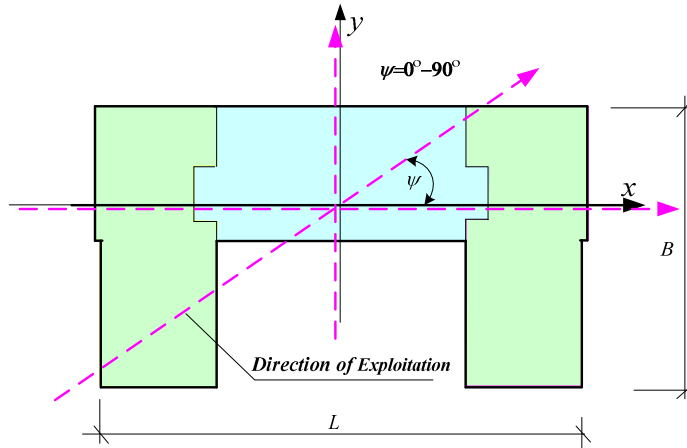


Fig. 4. Analyzed directions of a mining exploitation in view of the object

Rys. 4. Analizowane kierunki prowadzenia eksploatacji górniczej względem obiektu

The impact of mining operation on the building structure has been considered by the impact of a convex subsidence basin of the radius equal to $R=12\text{ km}$, corresponding to the impact at the level of upper limit of II category of mining area. The studies covered three directions of mining marked in Fig. 4. They were referred to the described axes of the building structure: in accordance with x axis, in accordance with y axis and at $\psi=45^\circ$ angle. The process of applying mining load consisted in introduction of defined function of ground displacement which corresponds to the first stage of convex basis formation.

4. Selected results of the study of expansion joints system

The effects of implementing expansion joints have been observed by changes in the values of stresses and deformations of wall components. Moreover, the influence of applying expansion joints on the form and values of natural vibrations have been checked.

4.1. Static response

The studies resulted in the values of deformation and stresses. The benchmark (base solution) was determined to be the state received in the model free of expansion joints (**A**) – Fig. 2a, expressing the values acquired in the other models as the percentage share. The selected results of values of vertical stress (σ_{22}), contact stress (σ_{12}), main deformation (ε_1) and shape deformation (ε_{12}) have been contained in Table 4. The images of deformation distribution of wall elements have been presented in Fig. 5.

Table 4. Tabulated summary of impact the expansion on the effort of the load-bearing walls

Tabela 4. Zestawienie wpływu dylatacji na wyężenie ścian nośnych obiektu

Radius – $R=12\text{ km}$ on the direction $x - \psi=0^\circ$								
Model	σ_{22} [kPa]	Percentage [%]	σ_{12} [kPa]	Percentage [%]	ϵ_1 [‰]	Percentage [%]	ϵ_{12} [‰]	Percentage [%]
A	706	100	486	100	0,419	100	0,555	100
B	666	94	412	85	0,390	93	0,471	85
C	49	7	58	12	0,038	9	0,067	12
D	166	24	128	26	0,101	24	0,147	26
Radius – $R=12\text{ km}$ on the direction $y - \psi=90^\circ$								
Model	σ_{22} [kPa]	Percentage [%]	σ_{12} [kPa]	Percentage [%]	ϵ_1 [‰]	Percentage [%]	ϵ_{12} [‰]	Percentage [%]
A	326	100	126	100	0,160	100	0,144	100
B	66	20	43	34	0,053	33	0,049	34
C	290	89	108	85	0,102	64	0,119	82
D	67	21	40	32	0,050	31	0,046	32
Radius – $R=12\text{ km}$ on the direction $xy - \psi=45^\circ$								
Model	σ_{22} [kPa]	Percentage [%]	σ_{12} [kPa]	Percentage [%]	ϵ_1 [‰]	Percentage [%]	ϵ_{12} [‰]	Percentage [%]
A	1360	100	546	100	0,666	100	0,624	100
B	439	32	379	69	0,313	47	0,434	71
C	150	11	50	9	0,080	12	0,087	14
D	178	13	106	19	0,104	16	0,121	19

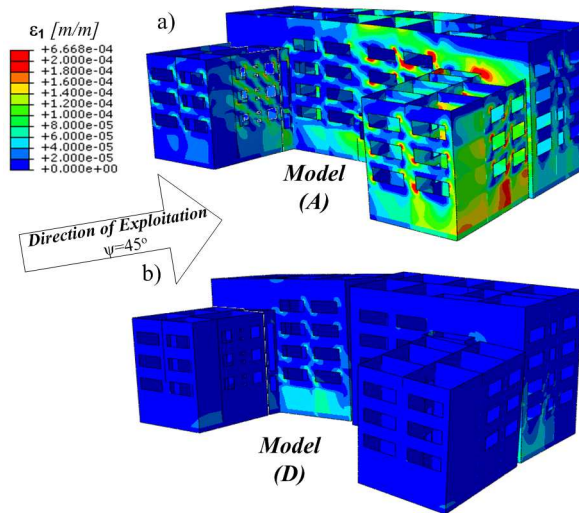


Fig. 5. The distribution of main strain: a) model A, b) model D

Rys. 5. Rozkład odkształceń głównych: a) model A, b) model D

Considering the largest decrease in structure effort received in the study for efficient selection of expansion joints, the most efficient model is **C** – Fig. 2c. There is one prerequisite, namely mining may not be conducted in Y direction as this model gets the worst results as compared to the other models. The division of the building structure with expansion joints in line with administrative division seemed the most convenient; still not the best one as the results of the dynamic analysis show. Nevertheless, in the worst case i.e. with Y direction mining, the decline of effort reaches the level of about 20%. This means that such expansion joints system might be applied if it were the most convenient from the point of view of consequent use of the building structure. Another possibility for this expansion joints system is to assume a specific direction of mining. In the event the direction is unknown or variable and seeking to obtain better results in effort reduction, the expansion joints system represented by **D** model should be applied. This division results in four parts of the building structure - Fig. 2d. It is efficient regardless of the direction of mining operation and the value of effort of wall structure of the building including expansion joints measured with the rates of analyzed stresses and deformations according to **D** system is by over 70% lower as compared to **A** model, i.e. the model with no expansion joints being applied in the building.

4.2. Dynamic response

With reference to the results obtained in static analysis, **A** and **D** models have been adopted for the second stage, i.e. dynamic analysis. An impact of expansion gap application on the forms and values of natural vibrations frequency has been analyzed. They were compared with the model without expansion joints considering bending shapes on y axis (ω_1), on x axis (ω_2) and torsion shape (ω_3). The values of natural vibrations of models **A** and **D** are contained in Table 5, and the primary shapes of natural vibrations of models **A** and **D** are presented in Fig. 6. When comparing the shapes of natural vibrations frequencies of numerical models, the value of natural vibrations frequency in model **D** is by 33% lower as compared to the model without expansion joints. In the event of calculations under response spectrum analysis, by applying a master spectrum of the specific area, lower values of forces are obtained.

Table 5. Tabulated summary of values of the natural frequency of the analyzed models

Tabela 5. Zestawienie wartości częstotliwości drgań własnych analizowanych modeli

Model	Shape of a natural frequency	ω [Hz]	Model	Shape of a natural frequency	ω [Hz]
A	bending on the y axis	3,27	D	bending on the y axis	2,20
	bending on the x axis	3,56		bending on the x axis	2,69
	torsion	4,70		torsion	5,16

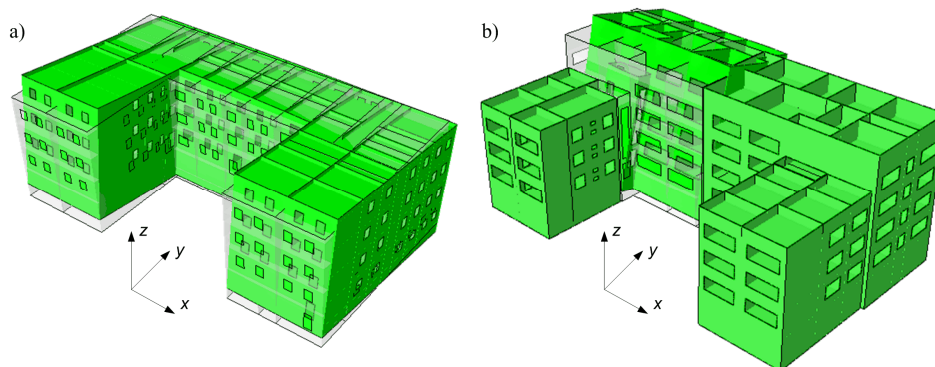


Fig. 6. The comparison of the first shape of the natural frequency: a) model **A**, b) model **D**

Rys. 6. Porównanie postaci pierwszych częstotliwości drgań własnych: a) model **A**, b) model **D**

5. Summary

Economic profitability of protecting the existing building structure against mining impacts with a use of expansion joints depends upon the shape, dimensions of horizontal projection of the building structure and significance of the building structure for its owner. The results of analyses conducted in the study lead to the conclusion that with respect to structure effort:

- under any division of the building body into smaller parts with simpler horizontal projection and equal heights, the effort of structure elements is lower than in the case of non-divided building – even by up to 70%,
- the most efficient system of expansion joints in the case under the study is the division described as model **D**. In this case the efficiency measured by the decline of the intensity of stress and deformation state in structure elements is noticeable regardless of mining operation in relation to the location of the building structure,
- the application of expansion joints each time resulted in considering the building structure to be resistant to the activity of II category of mining area,
- the system conforming to **D** model resulted in the reduction of natural vibrations frequency by 30%.

Conducting the process of protecting a building structure requires different directions of mining operation in relation to the location of the building structure to be considered. In such case the nearest planned mining operation presented in geological-mining opinion may not be solely and exclusively taken into account.

Bibliography

- [1] Instrukcje, Wytyczne, Poradnik 416/2006. Projektowanie budynków na terenach górniczych. Wydawnictwo ITB, Warszawa 2006.
- [2] Instrukcja 364/2007: Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2007.
- [3] Praca zbiorowa: Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi. Wyd. Śląsk, Katowice 1980.
- [4] Praca zbiorowa: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Wyd. GIG Katowice 1997.
- [5] Fedorowicz J.: Zagadnienie kontaktowe budowla – podłoże gruntowe. Część II. Kryteria tworzenia i oceny modeli obliczeniowych układów konstrukcja budowlana – podłoże górnicze. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Budownictwo, nr 1805, z. 114, Gliwice 2008.
- [6] Fedorowicz J., Mrozek M., Mrozek D.: Ochrona budynków murowanych na terenie górniczym. Część 1 - rozważania teoretyczne, Przegląd Górniczy, tom 70, nr 8 (1101), 2014, 85-92.
- [7] Fedorowicz J., Mrozek M., Mrozek D.: Ochrona budynków murowanych na terenie górniczym. Część 2 - porównanie analiz klasycznych i współczesnych, Przegląd Górniczy, tom 70, nr 8 (1101), 2014, 93-101.
- [8] Fedorowicz J., Mrozek M., Mrozek D.: Ochrona budynków murowanych na terenie górniczym. porównanie analiz klasycznych i współczesnych, Modelowanie Inżynierskie, tom 22, nr 53, 2014, 45-51.

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI UKŁADÓW DYLATACJI W BUDYNKU WIELORODZINNYM OBCIĄŻONYM WPŁYWEM EKSPLOATACJI GÓRNICZEJ

Streszczenie

Istnieje szereg możliwości zabezpieczenia istniejącego budynku przed negatywnym wpływem wynikającym z prowadzonej lub prognozowanej eksploatacji górniczej. Te dodatkowe obciążenia na terenie górniczym zależą m.in. od skutków eksploatacji złóż węgla kamiennego na powierzchni. Jedną z podstawowych metod zabezpieczenia obiektu budowlanego jest przeprowadzenie podziału bryły budynku na mniejsze i regularne w rzucie poziomym części, czyli jego dylatowanie. W wyniku takiego działania oczekiwane jest zmniejszenie wyężenia elementów nośnych konstrukcji, obciążonej dodatkowo wpływem górniczym. Problemem jest zrealizowanie prawidłowej i efektywnej przerwy dylatacyjnej w złożonym rzucie istniejącego budynku.

Praca zawiera wyniki analiz numerycznych modelu budynku wielorodzinnego o rozległym i nieregularnym rzucie poziomym, z zastosowaniem trzech układów jego dylatowania. Rezultaty obliczeń porównano z wynikami analizy modelu bez uwzględnienia dodatkowego zabezpieczenia. Dokonano zestawienia rozwiązań z uwzględnieniem różnych kierunków prowadzenia eksploatacji górniczej pod obiektem. Analizie poddano m.in. rozkład sił w ścianach nośnych budynku.

Słowa kluczowe: eksploatacja górnicza, deformacje podłoża, zabezpieczenie budynków, metoda elementów skończonych

Przesłano do redakcji: 04.12.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Martyna RABENDA¹
Marcin KAMIŃSKI²

DUAL PROBABILISTIC ANALYSIS OF THE TRANSIENT HEAT TRANSFER BY THE STOCHASTIC FINITE ELEMENT METHOD WITH OPTIMIZED POLYNOMIAL BASIS

The main aim of this work is to contrast three various probabilistic computational techniques, namely analytical, simulation and perturbation-based, in a solution of the transient heat transfer problem in specific axisymmetric problem with Gaussian uncertainty in physical parameters. It is done thanks to a common application of the Finite Element Method program *ABAQUS* (for the deterministic part) and symbolic algebra system *MAPLE*, where all probabilistic procedures have been programmed. We determine up to the fourth order probabilistic characteristics of the resulting temperatures, i.e. expectations, coefficients of variation, skewness and kurtosis together with the histograms – all as the functions of the input coefficient of variation of random heat conductivity coefficient. Stochastic perturbation technique is implemented here using the tenth order Taylor series expansion and traditional Least Squares Method released with polynomial basis whose final order is a subject of the separate statistical optimization. Probabilistic results computed show almost perfect agreement of all the probabilistic characteristics under consideration, which means that the traditional simulation method may be replaced due to the time and computer scale savings with the stochastic perturbation method.

Keywords: heat transfer; Stochastic Finite Element Method; Monte-Carlo simulation; stochastic perturbation technique

1. Introduction

Heat transfer phenomena in both statistically homogeneous and heterogeneous media include a number of uncertainty sources as stochastic fluctuations and waviness of boundaries and boundary conditions, natural unpredictability of physical properties of solids, fluids, gases or their mixtures as well as their material parameters. Such phenomena were under consideration since many years, cf.

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Martyna Rabenda, Politechnika Łódzka, Katedra Mechaniki Konstrukcji, Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź; tel. 48-42-6313564; martyna.rabenda@p.lodz.pl.

² Marcin Kamiński, Politechnika Łódzka, Katedra Mechaniki Konstrukcji, Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź; tel. 48-42-6313571; marcin.kaminski@p.lodz.pl

Chorin (1974) [1] and Emery (2004) [2], also in the context of various couplings with fluid flow or mass transfer. There exists a number of different techniques available to determine probabilistic moments of the temperature distribution (and its time fluctuation) as the Monte-Carlo simulation (Binder and Heermann (1977) [3]), polynomial chaos and Karhunen-Loeve expansions (Xiu and Karniadakis (2003) [4]), stochastic perturbation methods, see Kamiński (2013) [5], and even interval analysis approach engaged by Wang and Qiu (2015) [6]. It is widely known that traditional Monte-Carlo simulation is usually the very large time consuming probabilistic computational method, especially in the view of highly unstable heating or freezing processes that demand a huge number of time steps until steady state is reached.

That is why a reliable numerical stochastic method of significantly lower overall cost is required, which additionally allows for a determination of higher order statistics to enable for a recognition of probability distribution of the resulting temperature or heat flux. Therefore, the main aim of this paper is to demonstrate an implementation of the transient heat transfer analysis with Gaussian random parameters by using of the generalized stochastic perturbation technique. Time and computer power consumption in this method is relatively low with respect to any other existing probabilistic method. Its implementation is based on the Response Function Method, where nodal temperatures and their time fluctuations are approximated by random polynomials whose orders and coefficients are determined and optimized via separate FEM transient heat transfer experiments. Duality of this approach originates from the fact that it is possible to integrate these polynomials according to classical definitions of the probability theory and, alternatively, to include them into the Taylor series expansion to calculate basic probabilistic moments of the desired state parameters. This approach is illustrated with the use of statistically homogenous circular conductor having random conductivity and it is modeled by the three alternative probabilistic techniques - semi-analytical, simulation-based and the one adjacent to the generalized stochastic perturbation technique.

Deterministic transient heat transfer problem is solved numerically by using of the Finite Element Method program *ABAQUS/CEA* ver. 6.10 and also analytically thanks to the classical series solution. All the probabilistic procedures adjacent to a combination of two deterministic and three entirely different probabilistic method are implemented in the computer algebra system *MAPLE*, v. 17. We assume that heat conductivity coefficient k has Gaussian distribution with specified expectation and some a priori given variability interval for its coefficient of variation, $\alpha(k) \in [0.00, 0.15]$. We contrast here the basic probabilistic characteristics of the resulting temperature, i.e. its expectations, coefficients of variations, skewness and kurtosis at the steady-state conditions for in a specific point of the heated disk. An observed very good coincidence in-between these methods and their results makes the proposed dual probabilistic computational technique very

attractive and promising in further computational physics experiments. One needs to mention that this methodology may find its application to stochastic fire simulation similar to the considerations provided by Sakji, Soize and Heck (2009) [7].

2. Probabilistic analysis of the heat transfer problem

Generally, transient heat flow problem consists in determining the temperature field $\theta = \theta(x, \tau)$ governed by the following differential equation:

$$\rho c \dot{\theta} - (k_{ij} \theta_{,j})_{,i} - g = 0; x_i \in \Omega; \tau \in [0, \infty), i=1,2,3, \quad (1)$$

where c is the heat capacity characterizing the region Ω , ρ is the density of the material contained in Ω , k_{ij} is thermal conductivity tensor, while g is the rate of heat generated per unit volume; variables θ and τ denote temperature field values and time, respectively. This equation should fulfil the boundary conditions on the additional subsets of the external boundary $\partial\Omega$, that are given as follows:

1) temperature (essential) boundary conditions

$$\theta = \tilde{\theta}; x_i \in \partial\Omega_\theta, \quad (2)$$

and for $\partial\Omega_q$ part of the total $\partial\Omega$:

2) heat flux (natural) boundary conditions

$$\frac{\partial\theta}{\partial n} = \hat{q}; x_i \in \partial\Omega_q, \quad (3)$$

where $\partial\Omega_\theta \cup \partial\Omega_q = \partial\Omega$ and $\partial\Omega_\theta \cap \partial\Omega_q = \{\emptyset\}$. Initial conditions are proposed here as

$$\theta^0 = \theta(x_i; 0); x_i \in \Omega. \quad (4)$$

Let us consider further some continuous temperature variations $\delta\theta(x_i)$ defined in the interior of the region Ω and vanishing on $\partial\Omega_\theta$. Multiplying Eqn. (4) by the test function specified and integrating it over the entire Ω , we obtain

$$\int_{\Omega} \left(\rho c \dot{\theta} - (k_{ij} \theta_{,j})_{,i} - g \right) \delta \theta \, d\Omega = 0; \quad x_i \in \Omega; \quad \tau \in [0, \infty). \quad (5)$$

It is well known that this formulation is frequently rewritten as

$$\int_{\Omega} \left(\rho c \dot{\theta} \delta T + k_{ij} \theta_{,j} \delta \theta_{,i} - g \delta \theta \right) d\Omega - \int_{\partial\Omega_q} \hat{q} \delta \theta \, d(\partial\Omega) = 0; \quad (6)$$

$$x_i \in \Omega; \quad \tau \in [0, \infty).$$

The equation stated below is the transient formulation of the principle of virtual temperatures and is used to provide its stochastic perturbation technique counterpart relevant to the generalized stochastic perturbation technique [4]. We use for this purpose Taylor series expansion of random temperatures process as

$$\theta(k, \tau) = \theta^0(k^0, \tau) + \sum_{m=1}^n \frac{\varepsilon^m}{m!} \frac{\partial^m \theta(k, \tau)}{\partial k^m} \Big|_{k=k^0} (k - k^0)^m, \quad (7)$$

where k is heat conductivity coefficient characterizing isotropic media, n stands for the order of stochastic expansion, while superscript $(\cdot)^0$ means the mean values of the given parameter or state function. This Taylor series representation is inserted into the basic definitions, i.e. expected values $E[\theta(k, \tau)]$, standard deviations $\sigma(\theta(k, \tau))$, coefficient of variation $\alpha(\theta(k, \tau))$, skewness $\beta(\theta(k, \tau))$ and kurtosis $\kappa(\theta(k, \tau))$ to develop analytical perturbation-based formulas at the given time τ as

$$E[\theta(k, \tau)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \theta(k, \tau) p_k(x) dx, \quad (8)$$

$$\sigma(\theta(k, \tau)) = \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} (\theta(k, \tau) - E[\theta(k, \tau)])^2 p_k(x) dx \right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$\alpha(\theta(k, \tau)) = \frac{\sigma(\theta(k, \tau))}{E[\theta(k, \tau)]}, \quad \beta(\theta(k, \tau)) = \frac{\mu_3(\theta(k, \tau))}{\sigma^3(\theta(k, \tau))},$$

$$\kappa(\theta(k, \tau)) = \frac{\mu_4(\theta(k, \tau))}{\sigma^4(\theta(k, \tau))} - 3. \quad (9)$$

Obviously, $\mu_3(\theta(k, \tau)), \mu_4(\theta(k, \tau))$ denote here the third and the fourth central probabilistic moments of the temperature, while $p_k(x)$ is the probability density function (PDF) of random heat conductivity (postponed in full analytical version for a brevity of the presentation). Practical engineering computations include $\varepsilon=1$ and demand determination of higher order partial derivatives of the resulting temperature with respect to the randomized heat capacity. These are calculated from the hierarchical equations - the set of the algebraic equations of the systematically increasing order (from 0th up to the n th). Recursive form of these equations is demonstrated below with

- zeroth-order partial differential equation

$$\int_{\Omega} \left(\rho^0 c^0 \dot{\theta}^0 \delta T + k_{ij}^0 \theta_{,j}^0 \delta \theta_{,i} \right) d\Omega = \int_{\partial\Omega_q} \hat{q}^0 \delta \theta d(\partial\Omega) + \int_{\Omega} g^0 \delta \theta d\Omega, \quad (10)$$

- as well as the n th order equation

$$\int_{\Omega} \left(\sum_{l=0}^n \binom{n}{k} \left(\sum_{m=0}^l \binom{l}{m} \frac{\partial^l \rho}{\partial k^l} \frac{\partial^{l-m} c}{\partial k^{l-m}} \right) \frac{\partial^{n-l} \dot{\theta}}{\partial k^{n-l}} \right) \delta \theta d\Omega + \int_{\Omega} \left(\sum_{l=0}^n \binom{n}{l} \frac{\partial^l k_{ij}}{\partial k^l} \frac{\partial^{n-l} \theta_{,j}}{\partial k^{n-l}} \right) \delta \theta_{,i} d\Omega = \int_{\partial\Omega_q} \frac{\partial^n \hat{q}}{\partial k^n} \delta \theta d(\partial\Omega) + \int_{\Omega} \frac{\partial^n g}{\partial k^n} \delta \theta d\Omega \quad (11)$$

Further simplifications in this particular case study for the last equation are remarkable as most of the partial derivatives with respect to the input random variable simply vanish. Finally, having solved these equations for θ^0 and for up to the n th order partial derivatives, respectively, we derive the expressions for the expected values and higher probabilistic moments and the coefficients for temperature field and its time fluctuations.

3. Stochastic Finite Element Method equations

Let us assume that the region Ω is discretized by the use of the set of finite elements and that the scalar temperature field $\theta(x_i)$ is described by the nodal temperatures vector T_{α}

$$\theta(x_i) = \varphi_{\alpha}(x_i) T_{\alpha}; \quad i=1,2,3; \quad \alpha=1,2,\dots,N, \quad (12)$$

where N is the total number of degrees of freedom introduced. The temperature derivatives can be written in the form

$$\theta_{,i} = \varphi_{\alpha,i} T_{\alpha}, \quad i=1,2,3. \quad (13)$$

Moreover, let us introduce the capacity matrix $C_{\alpha\beta}$, the heat conductivity matrix $K_{\alpha\beta}$ and the vector P_{α} as follows:

$$\begin{aligned} C_{\alpha\beta} &= \int_{\Omega} \rho c \varphi_{\alpha} \varphi_{\beta} d\Omega, \quad K_{\alpha\beta} = \int_{\Omega} k_{ij} \varphi_{\alpha,i} \varphi_{\beta,j} d\Omega, \\ P_{\alpha} &= \int_{\Omega} g \varphi_{\alpha} d\Omega + \int_{\partial\Omega} \hat{q} \varphi_{\alpha} d\Omega. \end{aligned} \quad (14)$$

Next, let us introduce these matrixes into the additional variational formulation we obtain the following algebraic equations system:

$$C_{\alpha\beta} \dot{T}_{\beta} + K_{\alpha\beta} T_{\beta} = P_{\alpha}. \quad (15)$$

The main issue in transient problems is the additional time discretization using some time increment Δt . Then we can rewrite the last equation in the following manner:

$$C_{\alpha\beta} \frac{T_{\beta}(t + \Delta t) - T_{\beta}(t)}{\Delta t} + K_{\alpha\beta} T_{\beta}(t) = P_{\alpha}. \quad (16)$$

Considering the second component in this statement we obtain the explicit method, where the nodal temperatures vector in this component is taken at the beginning of this time step. However, it is possible to introduce the extra coefficient $0 \leq \delta \leq 1$ to include in this term the temperatures vector after the time step also. There holds

$$C_{\alpha\beta} \frac{T_{\beta}(t + \Delta t) - T_{\beta}(t)}{\Delta t} + K_{\alpha\beta} \{ \delta T_{\beta}(t + \Delta t) + (1 - \delta) T_{\beta}(t) \} = P_{\alpha}, \quad (17)$$

where $\delta = 0$ is equivalent to the explicit method, $\delta = 1/2$ serves for the Crank-Nicholson method, $\delta = 2/3$ stands for the Galerkin method and at last $\delta = 1$ is used in the implicit method (one can use this algorithm with δ as the extra input parameter); there are also three level schemes, where the temperatures in the moments $t + \Delta t, t, t - \Delta t$ are included at once.

Analogously to the previous considerations (provided also for the second order analysis before) we obtain the following systems of algebraic equations describing the generalized stochastic formulation of the transient heat flow problem:

- zeroth-order equation

$$C_{\alpha\beta}^0 \dot{T}_\beta^0 + K_{\alpha\beta}^0 T_\beta^0 = P_\alpha^0, \quad (18)$$

and the n th order equation

$$C_{\alpha\beta}^0 \frac{\partial^n \dot{T}_\beta}{\partial b^n} + K_{\alpha\beta}^0 \frac{\partial^n T_\beta}{\partial b^n} = \frac{\partial^n P_\alpha}{\partial b^n} - \sum_{m=1}^n \binom{n}{m} \frac{\partial^m C_{\alpha\beta}}{\partial b^m} \frac{\partial^{n-m} \dot{T}_\beta}{\partial b^{n-m}} - \sum_{m=1}^n \binom{n}{m} \frac{\partial^m K_{\alpha\beta}}{\partial b^m} \frac{\partial^{n-m} T_\beta}{\partial b^{n-m}}, \quad (19)$$

As it is clear now, the DDM version needs a formation and the solution of the increasing order equations obtained from the initial one by a systematic differentiation with respect to the random input variable provided in a quite deterministic way. It is also clear that the probabilistic transient problem needs successive polynomial responses from time increment to the time increment, therefore for a discrete time moment τ we introduce the following polynomial approximation:

$$T_\beta(\tau) = D_{\beta m}^\tau(\tau) b^m, \quad m=0, \dots, n-1; \beta=1, \dots, N, \tau \in [0, \infty). \quad (20)$$

Hence, it yields

$$\theta(x_i, \tau) = \varphi_\beta(x_i) T_\beta(\tau) = \varphi_\beta(x_i) D_{\beta m}^\tau(\tau) b^m; \quad i=1, 2, 3; \alpha=1, 2, \dots, N, \quad (21)$$

$$m=0, \dots, n-1; \tau \in [0, \infty).$$

Therefore, the temperature gradients are similarly determined as

$$\theta_{,j}(\tau) = \varphi_{\beta,j} T_\beta(\tau) = \varphi_{\beta,j} D_{\beta m}^\tau(\tau) b^m, \quad i=1, 2, 3, m=0, \dots, n-1; \tau \in [0, \infty). \quad (22)$$

Optimization of this local polynomial basis order n is inherent in its Least Squares Method approximation. An optimum choice is equivalent to the polynomial demonstrating extreme correlation to the set of FEM experiments (preferably should equal to 1). This polynomial should minimize at the same time the fitting variance and the RMS error of the entire fitting procedure (an illustration of this process is included in Table 1 below). Finally, one realizes that the temperature-dependent physical parameters may lead to further numerical complications in the SFEM implementation for transient problems using the Response Function Method even with polynomial basis.

4. Numerical analysis

We consider statistically homogeneous heat convector of the following circular solid domain (Fig. 1) where non-stationary heat transfer given by the Fourier law based on polar coordinate system (r, φ) is analyzed

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} = K \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (23)$$

where $K = c\rho/k$ includes in turn heat capacity c , mass density ρ as well as heat conductivity coefficient k . The boundary conditions are set on the outer surfaces of this axisymmetric region ($T(r = R_1) = T_1$ and $T(r = R_2) = T_2$) and are all fully deterministic.

As it is known, cf. Carslaw and Jaeger (1959) [8], this problem has some analytical solution expressed by the Bessel functions that can be rewritten as

$$\begin{aligned} \theta(r, t) = & \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{\ln(r) - \ln(R_1)}{\ln(R_2) - \ln(R_1)} \\ & - \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(a_n R_1) \cdot Y_0(a_n r) - J_0(a_n r) \cdot Y_0(a_n R_1)}{J_0(a_n R_1)^2 - J_0(a_n R_2)^2} \\ & \times J_0(a_n R_2) \{ \theta_1 J_0(a_n R_2) - \theta_2 J_0(a_n R_1) \} e^{-K a_n t} \end{aligned} \quad (24)$$

where $T_i = T \Big|_{r=R_i}, i=1,2$, and the coefficients a_n are non-negative square roots for the following algebraic equation:

$$J_0(aR_1) \cdot Y_0(aR_2) - J_0(aR_2) \cdot Y_0(aR_1) = 0 \quad (25)$$

while J_0, Y_0 are the well-known Bessel functions of the first kind.

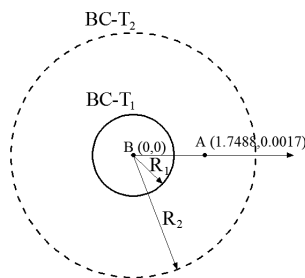


Fig. 1. Computational domain with the boundary conditions

Rys. 1. Geometria modelowanej struktury wraz z warunkami brzegowymi

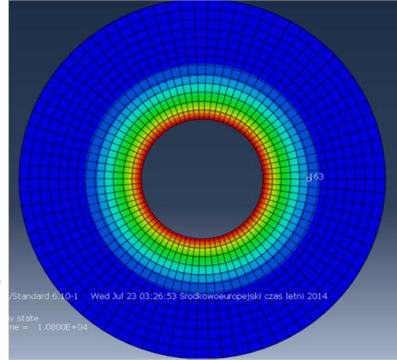


Fig. 2. Spatial discretization of the problem in the system ABAQUS

Rys. 2. Dyskretyzacja w programie MES ABAQUS

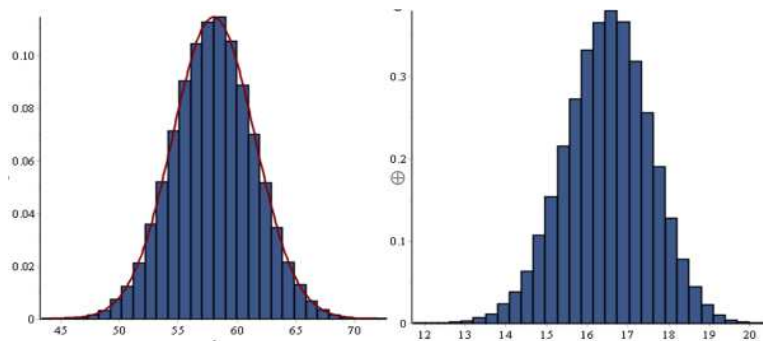
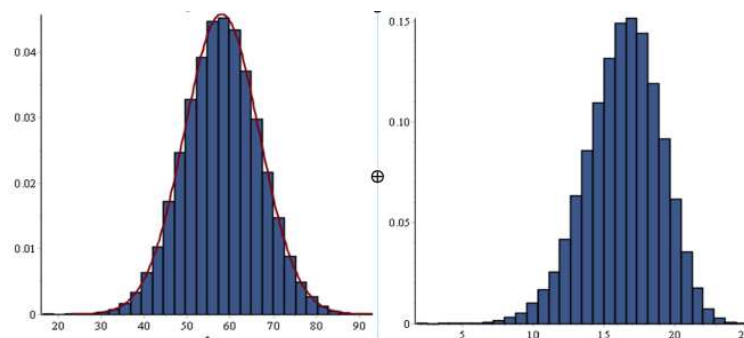
Analytical solution contrasted further in computational experiments is obtained in the program *MAPLE* with the first 318 expansion terms here and for the boundary temperatures equal to $T_1 = 100 [^{\circ}C]$, $T_2 = 0 [^{\circ}C]$, correspondingly. The following material properties are adopted (adjacent to the stainless steel plate in room temperature): $c = 440 \left[\frac{J}{m^4 K} \right]$, $\rho = 7800 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, while k is the input Gaussian random variable with the expectation $E[k] = 58 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ and coefficient of variation $\alpha(k) \in [0.00, 0.15]$. A series of the computational FEM solutions has been obtained with the system ABAQUS CEA, ver. 6.10 and its 4-noded linear heat transfer quadrilaterals (DC2D4 type) - spatial discretization includes 13 strips in radial direction and 82 finite elements on the inner and outer circumference (1088 in total) (Fig. 2). Time stepping procedure is based on the fundamental increment $\Delta t = 108$ secs and includes 100 increments until the steady-state conditions. The resulting temperature, whose probabilistic moments are contrasted further, has been obtained at the radius equal to $r = 1.74887 [m]$. The Least Squares Method has been programmed with the use of Taylor-Newton-Gauss algorithm that enables for direct computation of the correlation of the series of trial points with the fitting polynomial function as well as RMS error of this procedure, total sum of the residuals squares and the curve fitting variance. Such a statistical optimization has been carried out for the polynomials of the degrees from the ninth to the second one and it is based upon maximization of the correlation and minimization of the RMS error and the fitting variance at the same time; the additional data justifying the choice of the fifth order are collected in Table 1. A comparative Monte-Carlo simulation has been performed with the use of 10^5 random trials and it enables to contrast input with the output histograms of heat conductivity coefficient and the resulting temperatures for $\alpha(k) = 0.06$ (Fig. 3) and $\alpha(k) = 0.15$ (Fig. 4). The left histograms include both linear trends adjacent to the theoretical PDF shape; one may easily discover high

Table 1. Statistical optimization of the random polynomial basis order

Tabela 1. Optymalizacja statystyczna losowego wielomianu

Polynomial order	Correlation	RMS error	Squares sum	Variance
9	-0,430867	1,10017E11	1,33141E23	1,33404E22
8	0,714752	6,08909E8	4,07847E18	2,29869E19
7	0,276704	2,58471E7	7,34881E15	1,49208E15
6	0,999512	0,152492	0,255802	0,248877E-1
5	1,000000	0,312325E-2	0,107128E-3	0,100123E-4
4	0,999989	0,227047E-1	0,566403E-2	0,567674E-3
3	0,999678	0,122030	0,163791	0,163738E-1
2	0,995632	0,462267	2,35068	0,233968

quality of the Gaussian variable internal generator in the system *MAPLE*. It is remarkable that all the density functions are very close in their shapes to the Gaussian distributions. One may observe that the final PDF of the steady state temperature for $\alpha(k)=0.15$ (right graph in Fig. 4) shows some apparent non-zero skewness contrary to the PDF determined with a smaller value of the coefficient $\alpha(k)$.

Fig. 3. Histograms of input and output random variables for $\alpha = 0.06$ Rys. 3. Histogramy wejściowej i wynikowej zmiennej losowej dla $\alpha = 0.06$ Fig. 4. Histograms of input and output random variables $\alpha = 0.15$ Rys. 4. Histogramy wejściowej i wynikowej zmiennej losowej dla $\alpha = 0.15$

Further, we compute in turn the expected values, coefficients of variation, skewness and kurtosis for the polynomial of the fifth degree and depending on α in the range of 0,0÷0,15 and these statistical parameters are collected in Figs. 5-8. The results are summarized for both Stochastic Finite Element Method (SFEM)

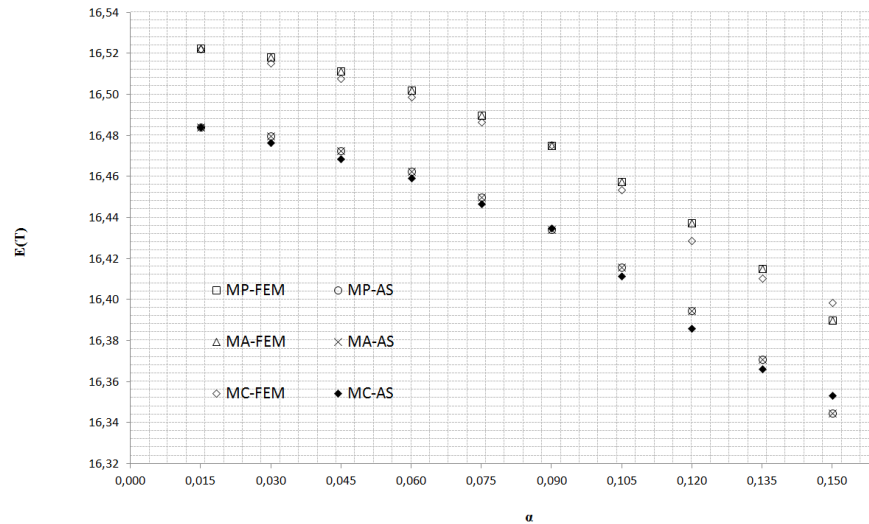


Fig. 5. Expected values of the temperature T_A as a function of input coefficient of variation α

Rys. 5. Wartości oczekiwane temperatury T_A w funkcji wejściowego współczynnika wariancji α

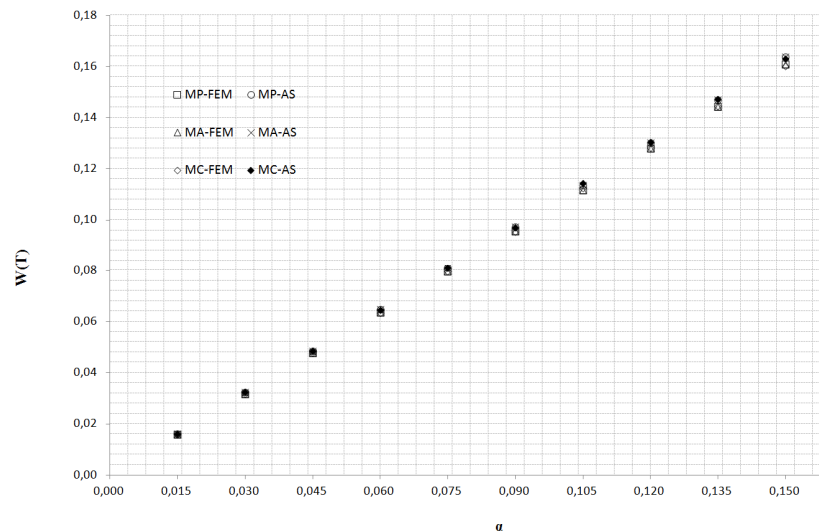


Fig. 6. Coefficients of variation of the temperature T_A as a function of input coefficient of variation α

Rys. 6. Współczynniki wariancji temperatury T_A w funkcji wejściowego współczynnika wariancji α

and analytical solution (AS) in such a way that additional abbreviation *MP* is adequate to the results obtained by the tenth order stochastic perturbation method, *MA* - represents the results obtained by analytical integration directly from the probability theory definitions and, consecutively, *MC* stands here for the results estimated via the Monte Carlo simulation scheme.

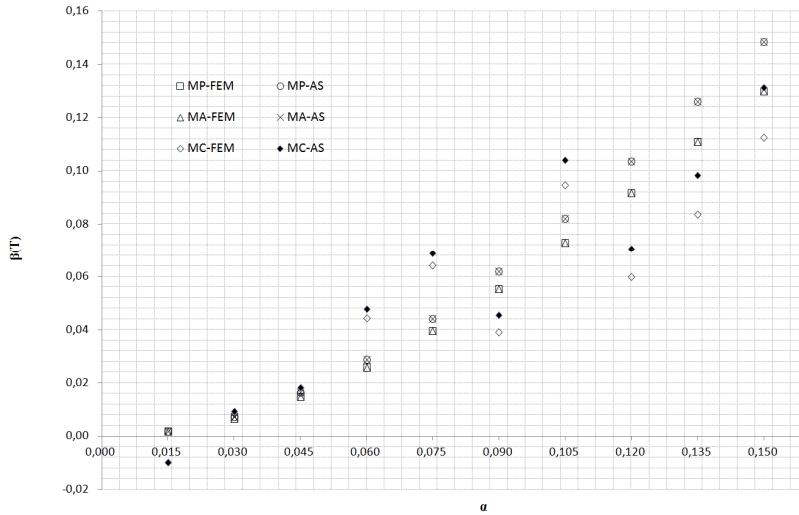


Fig. 7. Skewness of the temperature T_A as a function of input coefficient of variation α
Rys. 7. Skośność temperatury T_A w funkcji wejściowego współczynnika wariancji α

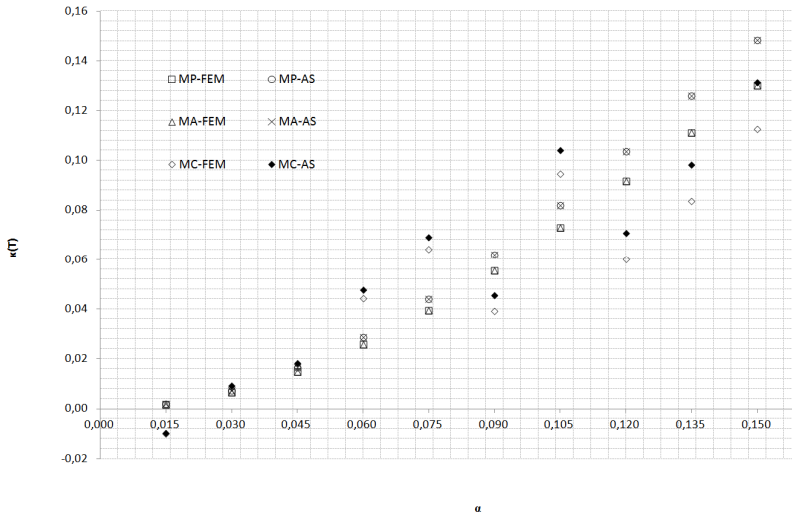


Fig. 8. Kurtosis of the temperature T_A as a function of input coefficient of variation α
Rys. 8. Kurtoza temperatury T_A w funkcji wejściowego współczynnika wariancji α

Expected values calculated via all the SFEM approaches show some underestimation of the analytical results. Additionally, these expectations decrease all moderately together with an increase of the input coefficient of variation. Systematically simulation, perturbation and integral methods return almost the same results with accidental numerical discrepancies. Coefficients of variation (Fig. 6) are all the same independently of the calculation method and all linearly increase together with $\alpha(k)$. This is a consequence of similarity of the temperatures histogram to the Gaussian bell-shaped curve detected before in Figs. 3-4. A comparison of skewness calculated via different methods (Fig. 7) is not so perfect but the principal trend remains the same – this is a nonlinear convex increase together with the input CoV through dominantly nonnegative values. Remarkably, the same range of all numerical results enable to conclude that the resulting PDF increases its positive skewness together with an increase of input random fluctuations. Similar observations concern the kurtosis of steady-state temperature (Fig. 8) – both FEM and series analytical solution return used in conjunction with any of the probabilistic method almost the same numbers here. One should remark that the total number of random trials applied for third and fourth order statistics (similarly to the analysis carried out by Wan and Karniadakis (2006) [9]) could be increased according to a remarkable asymptotic convergence of these estimators about their principal trends. Nevertheless, taking into account relatively small values of both skewness and kurtosis as well as constant ratio of the output versus input randomness level one needs to conclude that the final temperature has the probability density function very close to the Gaussian one.

5. Concluding remarks

The most important conclusion that can be drawn from this analysis is that the steady state temperature probabilistic characteristics are practically the same according to all the probabilistic methods included into this comparative study; this observation is almost independent of an input uncertainty in Gaussian heat conductivity coefficient. So that one may notice that the generalized stochastic perturbation technique implemented with the Least Squares Method with polynomial basis of an order subjected to statistical optimization overcomes most of numerical discrepancies and limitations of the Second Order Second Moment (SOSM) numerical technique, see Kamiński and Hien (1999) [10]. It enables for further time and computer effort savings, at least while studying Gaussian input uncertainties in transient heat transfer linear problems.

A precision of the generalized stochastic perturbation technique used in conjunction with the Finite Element Method for other probability distributions deserves some separate computational studies and comparative validation. It is very important to notice that the SFEM methodology proposed here enables for a very precise determination of higher order statistics of the temperatures during transient process with overall computational cost similar rather to the original

deterministic problem than the Monte-Carlo simulation scheme, even in its importance sampling version. Further implementation of this dual probabilistic technique towards SFEM modeling of transient heat transfer problems with state-dependent physical parameters should be provided. Its applicability to the solution of some inverse problems in thermodynamics is also notice worthy similarly to the research findings of Blackwell and Beck (2010) [11].

References

- [1] Chorin A.: Gaussian fields and random flow. *Journal of Fluid Mechanics* 63, 1974, pp. 21-32.
- [2] Emery A.F.: Solving stochastic heat transfer problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 28(3), 2004, pp. 279-291.
- [3] Binder K., Heermann D.W.: *Monte-Carlo Simulation in Statistical Physics. An Introduction*. 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1997.
- [4] Xiu D., Karniadakis G.E.: A new stochastic approach to transient heat conduction modelling with uncertainty. *International Journal of Heat & Mass Transfer* 46(24), 2003, pp. 4681-4693.
- [5] Kamiński M.: *The Stochastic Perturbation Method for Computational Mechanics*. Chichester, Wiley, 2013.
- [6] Wang C., Qiu Z.: Interval analysis of steady-state heat convection-diffusion problem with uncertain-but-bounded parameters. *International Journal of Heat & Mass Transfer* 91, 2015, pp. 355-362.
- [7] Sakji S., Soize C., Heck J.V.: Computational stochastic heat transfer with model uncertainties in a plasterboard submitted to fire load and experimental validation. *Fire Materials* 33(3), 2009, pp. 109-127.
- [8] Carslaw H.S., Jaeger J.C.: *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, London, 1959.
- [9] Wan X., Karniadakis G.: Stochastic heat transfer enhancement in a grooved channel. *Journal of Fluid Mechanics* 565, 2006, pp. 255-278.
- [10] Kamiński M., Hien T.D.: Stochastic finite element modelling of transient heat transfer in layered composites. *International Communications in Heat & Mass Transfer* 26(6), 1999, pp. 791-800.
- [11] Blackwell B., Beck J.V.: A technique for uncertainty analysis for inverse heat conduction problems. *International Journal of Heat & Mass Transfer* 53(4), 2010, pp. 753-759.

DUALNA PROBABILISTYCZNA ANALIZA NIESTACJONARNEGO PRZEPŁYWU CIEPŁA PRZY UŻYCIU STOCHASTYCZNEJ METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie

Głównym celem niniejszej pracy jest porównanie trzech różnych probabilistycznych metod numerycznych, tj. metody analitycznej, symulacyjnej, a także metody perturbacji, podczas rozwią-

zywania pewnego zagadnienia osiowo-symetrycznego, w którym współczynnik przewodnictwa ciepła jest Gaussowskim parametrem losowym. Porównanie takie jest przeprowadzone przy użyciu systemu Metody Elementów Skończonych *ABAQUS* (dla części deterministycznej rozwiązania), a także pakietu algebry komputerowej *MAPLE*, w którym zaimplementowano wszystkie procedury losowe. W pracy wyznacza się centralne momenty probabilistyczne do rzędu czwartego włącznie, tj. wartości oczekiwane, współczynniki wariancji, skośność i kurtozę, jak również odpowiednie histogramy – wszystkie one są wyznaczone w funkcji wejściowego współczynnika wariancji. Metoda perturbacji stochastycznej jest zaimplementowana przy użyciu rozwinięcia w szereg Taylora rzędu dziesiątego, a także z wykorzystaniem tradycyjnej Metody Najmniejszych Kwadratów. Metoda ta umożliwia wyznaczenie wielomianowej funkcji odpowiedzi, której rząd jest przedmiotem oddzielnej optymalizacji statystycznej. Otrzymane wyniki probabilistyczne pokazują bardzo dobrą zgodność wszystkich wyznaczanych charakterystyk losowych, co oznacza w praktyce, iż tradycyjna metoda symulacji może zostać zastąpiona przez metodę perturbacji stochastycznej w celu wielokrotnego zmniejszenia czasu oraz mocy obliczeniowej.

Słowa kluczowe: przepływ ciepła; Stochastyczna Metoda Elementów Skończonych; metoda symulacji Monte-Carlo; metoda perturbacji stochastycznej

Przesłano do redakcji: 02.02.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Jadwiga BIZON-GÓRECKA¹
Michał MATUSZCZAK²

ANALIZA TECHNOLOGICZNOŚCI ROZWIĄZAŃ PROJEKTOWYCH OBIEKTÓW BUDOWLANYCH O KONSTRUKCJI STALOWEJ

Celem artykułu jest wskazanie możliwości oceny jakości rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych poprzez analizę ich technologiczności, formułowanej też jako jakość technologiczna. Pojęcie technologiczności obiektu budowlanego zdefiniowano jako przystosowanie zastosowanych rozwiązań do łatwego i uzasadnionego ekonomicznie wykonania, zapewniającego spełnienie wymagań stawianych obiektowi w całym cyklu jego życia. Cykl życia obiektu budowlanego rozpoczyna artykułowanie potrzeb budowlanych, następnie pojawia się koncepcja i studium wykonalności przedsięwzięcia, po czym występuje projektowanie obiektu i procesów wykonawczych. Kolejne fazy cyklu życia obiektu to realizacja procesów logistycznych i budowlanych, które kończy oddanie do użytkowania. Dalej rozpoczyna się eksploatacja zakończona likwidacją. Podjęto próbę specyfikacji kryteriów oceny jakości technologicznej obiektów wznoszonych w konstrukcji stalowej z uwzględnieniem poszczególnych faz cyklu istnienia obiektów. Dociekania przeprowadzono na podstawie dostępnej literatury oraz praktycznych doświadczeń autorów opracowania. Wskazano potrzebę rozważań konstrukcyjno-materiałowych i metody wznoszenia obiektu jako grupy kryteriów ogólnych. Podkreślono, niezauważaną dotychczas, konieczność uwzględnienia w ocenie technologiczności perspektywy podmiotowej. Wynika to ze specyficznych wymagań stawianych obiektom budowlanym przez poszczególnych interesariuszy budowlanych projektów inwestycyjnych. Z uwagi na fakt, że procesy kształtowania obiektu w fazie programowej, projektowej i realizacyjnej są związane z procesami eksploatacyjnymi i fazą likwidacyjną, podkreślono, że każdy z interesariuszy winien postrzegać wszystkie etapy cyklu życia obiektu.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, jakość technologiczna, cykl życia obiektu

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Jadwiga Bizon-Górecka, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, tel. +48 501 637 067, e-mail: bizon@utp.edu.pl

² Michał Matuszczak, Firma Gotowski Budownictwo Komunikacyjne i Przemysłowe Sp. z o.o., ul. Toruńska 300, 85-880 Bydgoszcz, tel.+48 605760171, e-mail: m.matuszczak1975@gmail.com

1. Wprowadzenie

Problemy technologiczności opisywali m.in. Sadowski [7] i Jaworski [5]. Zagadnieniem technologiczności w odniesieniu do budowlanych konstrukcji stalowych zajmowali się między innymi Augustyn i Śledziwski [1].

Technologiczność rozwiązań budowlanych oznacza zespół cech określających możliwość łatwego i efektywnego wykonania obiektu budowlanego, jego ustrojów, elementów i wyrobów - w danych warunkach produkcyjnych – bez szkody dla rozwiązań funkcji, konstrukcji, walorów użytkowych i estetycznych. Musi uwzględniać wymagania wynikające z danego poziomu techniczno-organizacyjnego realizacji procesów budowlanych. Czynniki określające jakość technologiczną rozwiązań projektowych to wymagania technologiczności rozwiązań budowlanych [5].

Ocena jakości technologicznej rozwiązań budowlanych musi uwzględniać specyfikę branży budowlanej. Cechy specyficzne działalności budowlanej można rozpatrywać podejściem: przedmiotowym (poprzez analizę cech produktów branży i ocenę ich wpływu na działalność budowlaną) oraz podmiotowym (poprzez rozważania roli i znaczenia interesariuszy przedsięwzięć budowlanych).

Obiekty budowlane, jako efekty produkcji budowlanej, mogą być wnoszone według różnych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych i przy zastosowaniu wybranych metod realizacyjnych.

W ostatnich latach coraz większą popularność zdobywają konstrukcje stalowe. Wynika to z wielu zalet stosowania stali w budownictwie. Jedną z nich (najczęściej najważniejszą) jest niska cena. Uzyskuje się ją w wyniku ciągłego zmniejszania ilości stali w wykonywanych elementach konstrukcyjnych. Niska cena takich inwestycji wynika z faktu, że w przeciągu ostatnich lat dokonał się olbrzymi postęp technologiczny obróbki stali. Konstrukcje z kształtowników giętych na zimno są idealnym materiałem do budowania ścian działowych oraz nośnych konstrukcji głównych hal stalowych. Stosowanie coraz cieńszej blachy stalowej, jako materiału wyjściowego do produkcji belek, ilość niezbędnej do produkcji stali zmniejsza się, co przekłada się na tak pożądaną przez inwestorów spadek ceny.

Kolejną zaletą jest szybki i stosunkowo prosty proces montażu obiektów o konstrukcji stalowej z dostarczonych przez producenta stalowych prefabrykatów.

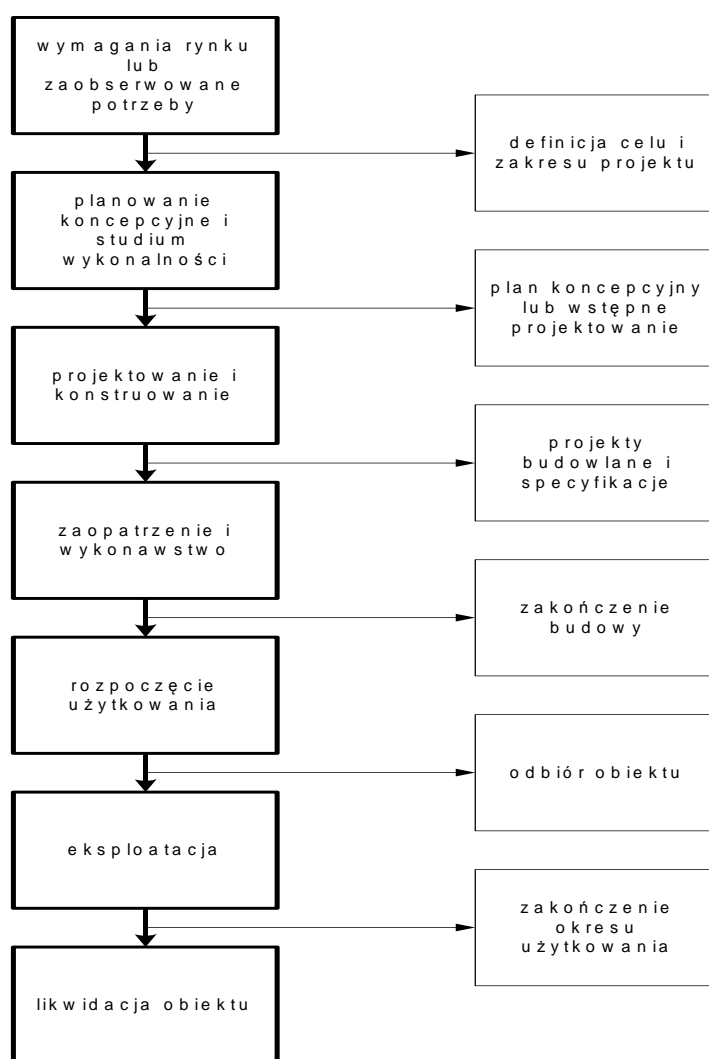
Może się to odbywać w krótkim czasie tylko dzięki łączeniu modułów - gotowych, stale powtarzających się w konstrukcji elementów, wcześniej przygotowanych przez producenta. Zadaniem montażystów jest odpowiednie połączenie wszystkich elementów w scaloną konstrukcję hali stalowej.

Powyższe zalety konstrukcji stalowych decydują w głównej mierze o tak wielkiej i stale rosnącej popularności stali, jako materiału budowlanego.

Zauważyć trzeba, że w projektach inwestycyjno-budowlanych uczestniczy szereg interesariuszy, wchodzących w relacje z przedmiotem przedsięwzięcia, tj. obiektem budowlanym na różnych etapach jego cyklu życia.

2. Cykl życia obiektu budowlanego a interesariusze projektu

Sekwencyjną postać cyklu życia obiektu budowlanego pokazuje rysunek 1.



Rys. 1. Cykl życia obiektu budowlanego (opracowano na podstawie [4])

Fig. 1. The life cycle of a building object (based on [4])

Cykl życia obiektu budowlanego, rozpatrywany z perspektywy inwestora, ma szeroki zakres: od powstania zamysłu wzniesienia obiektu budowlanego, poprzez fazę programowania, planowania, organizowania wszystkich procesów budowlanych i ich realizację, aż do fazy eksploatacji oraz likwidacji obiektu. Ta

perspektywa jest skoncentrowana na obiekcie budowlanym – jako produkcie działalności budowlanej. Trzeba jednak zauważyć, że problemy artykułowane w poszczególnych fazach cyklu życia takich obiektów odnoszą się też do pozostałych interesariuszy projektów. Jednak ich zaangażowanie jest w znacznej mierze zróżnicowane. Na przykład porównując akcentowanie poziomu istotności problemów, występujących w kolejnych fazach, przez inwestora i wykonawcę prac budowlanych uwidacznia się niemal równomierne traktowanie poszczególnych faz przez inwestora. Natomiast zainteresowaniem wykonawcy cieszy się faza projektowa i realizacyjna wraz z procesami logistycznymi.

3. Obiekty o konstrukcji stalowej – zagadnienia konstrukcyjno-materiałowe i wznoszenie

Jak podkreśla Z. Bolkowska [2] najczęściej konstrukcji stalowych stosuje się w budownictwie infrastrukturalnym a zastosowanie ich w budownictwie mieszkaniowym jest minimalne.

Na zalety konstrukcji stalowych składa się szereg właściwości i zalet samego materiału – stali, jak też możliwości konstruowania i wznoszenia obiektów budowlanych. Do głównych można zaliczyć:

- „elastyczność i uniwersalność” w dostosowywaniu się do zmieniających się technologii, możliwość przeprowadzania w łatwy sposób zmian konstrukcyjnych,
- uprzemysłowienie procesu produkcji konstrukcji, skrócenie czasu montażu i możliwość prowadzenia montażu w warunkach zimowych,
- wysoki stopień prefabrykacji, wytwarzanie w warsztacie w postaci elementów, wysyłkowych (przystosowanych gabarytami oraz ciężarem do środków transportu i montażu),
- w nowoczesnych konstrukcjach bardzo niski stopień zużycia stali,
- krótki cykl inwestycyjny,
- ograniczona wielkość placu budowy,
- duży stopień odzysku materiału po zakończeniu eksploatacji,
- możliwość ponownego wykorzystania części konstrukcji (dzięki połączeniom montażowym na śruby),
- duża wytrzymałość oraz jednorodność materiału - wysoka wytrzymałość na ścinanie, ściskanie oraz rozciąganie,
- względna lekkość konstrukcji stalowych (mniejsze koszty transportu oraz montażu).

Syntetyczne ujęcie analizy stosowania konstrukcji stalowych w budownictwie przedstawia tabela 1. Pokazana tam analiza SWOT ukazuje znaczną przewagę czynników pozytywnych nad szkodzącymi.

Tabela 1. Tabela SWOT stosowania stalowych konstrukcji stalowych (według [6])

Table 1. SWOT table of the use of steel structures (based on [6])

Tabela SWOT	
Silne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> - wysoka wytrzymałość stali na ścinanie, - względnie niska masa własna, - lekkość konstrukcji, - plastyczność stali - wysoki współczynnik sprężystości $E = 2100000\text{kg/cm}^2$, - jednorodna struktura, - możliwość użytkowania obiektu budowlanego zaraz po wykonaniu, - odporność na działanie sił dynamicznych, - możliwość przenoszenia znacznych obciążeń przy względnie małych wymiarach elementów, - wytrzymałość na rozciąganie, - elastyczność kształtowania powierzchni, - możliwość modernizacji stalowego obiektu budowlanego, - możliwość odzyskania materiału (ekologiczność), - możliwość wznoszenia konstrukcji o bardzo dużych rozpiętościach, - krótki czas montażu elementów stalowych (skracanie czasu trwania budowy) 	<ul style="list-style-type: none"> - wrażliwość na korozję, - odkształcalność stali w ogniu, - ogniochronność, - duża przewodność cieplna, - duża przewodność akustyczna, - wrażliwość na działanie temperatury, - konieczność przeprowadzania okresowych konserwacji (podniesienie kosztów eksploatacji) - wrażliwość na obciążenia udarowe
Szanse	Zagrożenia
<ul style="list-style-type: none"> - wprowadzanie na rynek nowych gatunków stali o coraz lepszych właściwościach, - wprowadzanie nowych metod ochrony antykorozyjnej, - większe zainteresowanie wznoszeniem obiektów stalowych (zwiększony popyt) 	<ul style="list-style-type: none"> - coraz większa liczba firm zajmujących się konstrukcjami stalowymi powoduje wzrost ryzyka obniżenia jakości

4. Kryteria oceny jakości technologicznej obiektów o konstrukcji stalowej w cyklu ich życia a interesariusze przedsięwzięć

Kryteria oceny jakości technologicznej rozwiązań projektowych obiektów budowlanych [3] można generalnie podzielić na: kryteria natury ogólnej, uwzględniające przyjęte rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe oraz kryteria szczegółowe odnoszące się do kolejnych faz cyklu życia obiektu budowlanego jako efektu produkcji budowlanej. Problemy ujęte w kryteriach oceny technologiczności mają zmienną siłę oddziaływania na interesy poszczególnych uczestników przedsięwzięcia budowlanego. Wycena kryteriów musi być dokonywana indywidualnie w perspektywie zainteresowanych podmiotów, np.: inwestorów, projektantów, wykonawców robót budowlanych, dostawców materiałów budowlanych, użytkowników obiektu, społeczności lokalnej, administracji budowlanej.

Próbie specyfikacji tych kryteriów wraz z uwidocznieniem ich znaczenia dla oceny technologiczności obiektów o konstrukcji stalowej przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Kryteria oceny technologiczności obiektów o konstrukcji stalowej

Table 2. Technological quality criteria of steel constructions objects

Lp.	Kryteria	Opis kryterium	Interesariusze	Uwagi odnośnie konstrukcji stalowych
I. Kryteria ogólne				
I.1	rozwiązanie konstrukcyjno-materiałowe	rozwiązania mogą być oceniane z użyciem analizy SWOT	wszyscy uczestnicy przedsięwzięcia	przewaga pozytywnych stron obiektów o konstrukcji stalowej
I.2	metoda wznoszenia obiektu	wybór rozwiązań może odnosić się do stopnia prefabrykacji konstrukcji	wszyscy uczestnicy przedsięwzięcia	konstrukcje stalowe są zwykle prefabrykowane
II. Kryteria szczegółowe				
II.1	sformułowane potrzeby budowlane	w toku formułowania tego kryterium pojawiają się przesłanki do wyboru rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego	inwestorzy, projektanci, użytkownicy obiektu, społeczność lokalna, administracja budowlana	konstrukcje stalowe dają szersze możliwości kształtowania zabudowy przestrzeni
II.2	koncepcja i studium wykonalności	doprecyzowanie rozwiązania obiektu, studium wykonalności winno sygnalizować problemy w obrębie całego cyklu życia obiektu	inwestorzy, projektanci, użytkownicy obiektu, społeczność lokalna, administracja budowlana	konstrukcje stalowe dają możliwości przewidywania parametrów wytrzymałościowych na wysokim poziomie ufności
II.3	projekt obiektu i procesów budowlanych	rozwiązania funkcjonalno-użytkowe, metody i techniki realizacyjne	wszyscy uczestnicy przedsięwzięcia	konstrukcje stalowe dają możliwość elastycznego zagospodarowania przestrzeni
II.4	procesy logistyczne	szczegóły logistyczne obejmujące rozwiązania dostaw zasobów, w tym środki transportu, drogi przemieszczania i miejsca dostarczania	inwestorzy, projektanci, wykonawcy robót budowlanych, dostawcy materiałów budowlanych, społeczność lokalna, administracja budowlana	prefabrykaty konstrukcji stalowych mogą być wytwarzane u wykonawcy robót lub w innych zakładach co uelastycznia procesy logistyczne
II.5	procesy budowlane	przedstawienie wariantów technologiczno-organizacyjnych	inwestorzy, projektanci, wykonawcy robót budowlanych, dostawcy materiałów budowlanych, społeczność lokalna, administracja budowlana	organizacja montażu konstrukcji stalowych może przewidywać montaż ze składowisk przyobektowych lub według metody „just in time”
II.6	eksploatacja	problemy bezpiecznej eksploatacji obiektu, utrzymanie obiektu w stanie pełnej użyteczności, zasady kontroli stanu technicznego	inwestorzy, projektanci, wykonawcy robót budowlanych, dostawcy materiałów budowlanych, użytkownicy obiektu, społeczność lokalna, administracja budowlana	potrzeba skupienia uwagi na zabezpieczeniach antykorozyjnych konstrukcji stalowych
II.7	likwidacja	metody prac rozbiórkowych, odzysk materiałów, problemy bezpieczeństwa przy rozbiórce	inwestorzy, projektanci, społeczność lokalna, administracja budowlana	konstrukcje stalowe mają w fazie likwidacji wysoką jakość ekologiczną

5. Podsumowanie

Rozważanie problemów jakości technologicznej rozwiązań projektowych winno uwzględniać kryteria ogólne, opisujące cechy charakterystyczne dla danego typu konstrukcji, interesujące wszystkich uczestników przedsięwzięcia. Natomiast szereg kryteriów szczegółowych, odnoszących się do poszczególnych faz życia obiektu budowlanego, trzeba rozważać indywidualnie z perspektywy konkretnego interesariusza projektu.

Analiza technologiczności rozwiązań projektowych, pozwala poszczególnym interesariuszom na wykorzystanie oceny jakości technologicznej obiektów w podejmowaniu decyzji o wyborze rozwiązań projektowych (np. przez inwestora), czy o zaangażowaniu się w dane przedsięwzięcia budowlane (np. przez wykonawcę zadań budowlanych).

W ocenie technologiczności, w zależności od rozważanego podmiotu, zróżnicowany może być dobór kryteriów szczegółowych, jak też wagi przypisane poszczególnym kryteriom, wycenianym według wybranych zasad parametryzacji, np. w przyjętej skali punktowej.

Literatura

- [1] Augustyn J., Śledziewski E.: Technologiczność konstrukcji stalowych, Arkady, Warszawa 1981.
- [2] Bolkowska Z.: Budownictwo i konstrukcje stalowe u progu nowej perspektywy finansowej UE (2014-2020), Konstrukcje stalowe, nr 3, 2014, s. 8-10.
- [3] Czemplik A., Irzyk M.: Ocena technologiczności projektów budowlanych, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Civil and Environmental Engineering (Budownictwo i Inżynieria Środowiska), nr 2, 2011, s. 225-228.
- [4] Hendrickson Ch.: Project Management for Construction. Fundamental Concepts for Owners, Engineers, Architects and Builders, Department of Civil and Environmental Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh 2003.
- [5] Jaworski K.M.: Metodologia projektowania realizacji budowy, Polskie Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2009.
- [6] Michalska A.: Analiza szans i zagrożeń stosowania konstrukcji stalowych w budownictwie na wybranym przykładzie, Praca magisterska napisana pod kierunkiem J. Bizon-Góreckiej, WBAiIS UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2016.
- [7] Sadowski Z.: Technologiczność prefabrykowanej konstrukcji żelbetonowej, Arkady, Warszawa 1983.

MANUFACTURABILITY ANALYSIS OF STEEL STRUCTURES

Summary

A purpose of the article is to point out a possibility of assessing the quality of construction and material solutions by analyzing their manufacturability, understood as a technological quality. A concept of manufacturability of buildings is defined as an adaptation of the solutions to get

an easy and economically viable performance, ensuring a fulfillment of all requirements imposed on a building throughout its life cycle. An objective and needs are identified in the beginning of the building life cycle of the construction. Then there is a conceptual design and a feasibility study followed by a detailed design and creating a documentation. After that there are construction processes along with construction logistics and building commissioning in the end. Next an operation and a maintenance are followed by a demolition. It was made an attempt to specify some factors of assessing the technological quality of steel frame buildings especially in each phase of the building life cycle. Studies were carried out on the basis of the available literature and practical experience of the authors. It was indicated that a need for considering the construction and material solutions is very important. A so-far-neglected need for taking into consideration a stakeholder perspective in a manufacturability assessment was emphasized in the article. It results from some specific requirements of the building given by project stakeholders. Due to the fact that shaping an object in a concept-design-construction phase is related to building operations-maintenance-demolition phase, each stakeholder should consider all stages of the building life cycle.

Keywords: steel structures, technological quality, life cycle

Przesłano do redakcji: 6.02.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Adam RYBKA¹
Michał KRUPA²

KONSTRUKCJA I ARCHITEKTURA HAL SPORTOWYCH NA PODHALU (NA WYBRANYCH PRZYKŁADACH)

Niniejszy artykuł dotyczy problematyki konstrukcji i architektury czterech wybranych hal sportowych na Podhalu. Dwie z nich zlokalizowane są w Nowym Targu: pierwsza przy budynku Zespołu Szkół Ekonomicznych przy ul. Kowaniec, druga przy Specjalnym Ośrodku Szkolno-Wychowawczym przy ul. Jana Pawła II. Dwie kolejne to obiekty zaprojektowane w Rabce - Zdroju: przy Liceum Ogólnokształcącym im. E. Romera oraz przy Zespole Szkół, przy ul. Kościuszki. W związku z faktem, że przedmiotowe obiekty są zlokalizowane na Podhalu to warunki klimatyczne oraz ukształtowanie terenu wymusiły zastosowanie w ich projektach niestandardowych rozwiązań technicznych, zwłaszcza konstrukcyjnych, które warto są opisać. We wszystkich czterech przypadkach konstrukcja istotnie wpływa na architekturę, a o stopniu tego oddziaływania w różnej mierze decydowały lokalizacja lub założenia funkcjonalne.

Słowa kluczowe: hala sportowa, Podhale, Rabka Zdrój, Nowy Targ

Podhale jest regionem charakterystycznym, zarówno pod względem sztuki budowania, form architektonicznych jak i stosowanych konstrukcji [1]. Projektowanie na tym terenie wymaga od architekta nawiązania do kontekstu czyli do form i proporcji obiektów zlokalizowanych w regionie [2], ale także dostosowania się do trudnych warunków klimatycznych oraz często także terenowych.

Poniżej zaprezentowano cztery projekty hal sportowych zlokalizowanych właśnie na Podhalu, w Nowym Targu i Rabce-Zdroju (fot. 1-6). Dwa z nich: hala przy budynku Zespołu Szkół Ekonomicznych w Nowym Targu oraz przy Liceum Ogólnokształcącym im. E. Romera w Rabce-Zdroju doczekały się już realizacji. Pozostałe, mają już decyzje pozwolenia na budowę i powstaną zapewne w ciągu najbliższych dwóch lat.

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Adam Rybka Zakład Urbanistyki i Architektury, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, bud. "V", 35-959 Rzeszów, tel. (+4817) 865 1658, e-mail: akbyr@prz.edu.pl

² Michał Krupa, Zakład Urbanistyki i Architektury, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, bud. "V", 35-959 Rzeszów, tel. (+4817) 865 1658, e-mail: mkrupa@prz.edu.pl

Pierwszym obiektem wartym opisania jest hala sportowa przy budynku Zespołu Szkół Ekonomicznych w Nowym Targu, przy ul. Kowaniec. Obiekt ten powstał przy istniejącym budynku szkoły, z którym został połączony za pomocą łącznika komunikacyjnego. Hala (wraz z zapleczem) o wymiarach zewnętrznych w rzucie 31,37 m x 25,00 m oraz wysokość 15,00 m została zlokalizowana w południowo-zachodniej części działki szkoły. Podłużna oś hali została zorientowana w kierunku pd.-wsch. – pn.-zach. Prostopadle do podłużnej osi sali, ze wschodniego narożnika zaplecza wyprowadzony jest łącznik komunikacyjny (o długości 20,14 m i wysokości 3,86 m), który łączy się z istniejącym budynkiem w jego zachodnim narożniku.

Architektura hali sportowej nawiązuje do form i proporcji architektury regionu, które bezpośrednio wynikają z doświadczeń związanych z funkcjonowaniem budynków w lokalnym klimacie. Jednocześnie jest efektem zastosowanych tutaj rozwiązań konstrukcyjnych oraz podporządkowania się zasadom kształtowania architektury w budynkach pasywnych i energooszczędnych – zwarta bryła sali z zapleczem, duże przeszklenia od południa, minimalna ilość otworów od północy, okapy i żaluzje chroniące wnętrze przed przegrzaniem w miesiącach letnich [3]. Wyraz estetyczny budynku podkreślają projektowane materiały wykończeniowe – w naturalnych kolorach – drewno, blacha tytanowo-cynkowa, tynk (nawiązujący kolorem do surowego betonu – współczesnego kamienia) [4].

Obiekt posadowiony został na żelbetowych stopach, ławach i ścianach fundamentowych. Pod słupami żelbetowymi stanowiącymi wsparcie dachu hali zaprojektowano stopy fundamentowe. Pod ścianami zaplecza natomiast zaprojektowano ławy fundamentowe.

Konstrukcja hali to układ stalowych wiązarów dachowych opartych na żelbetowych słupach, natomiast wypełnienie ścian zewnętrznych stanowią pustaki z ceramiki poryzowanej. Główną konstrukcję nośną dachu nad halą stanowi stalowy więzary krokwiowo-jętkowy. W celu przeniesienia rozporu więzara zaprojektowano ściąg w poziomie oparcia więzara na słupach. Na więzarze oparto jednoprzęsłowe płatwie, stanowiące konstrukcję nośną dla krokwi drewnianych. W celu przeniesienia parcia wiatru zaprojektowano stężenia połaciowe poprzeczne typu X w polach przedskrajnych z prętów $\varnothing 20$, naciąganych śrubami rzymskimi. Konstrukcję wsporcą dachu hali stanowią słupy żelbetowe zbrojone, zamocowane wspornikowo w stopach fundamentowych. W celu przeniesienia reakcji od wiązarów stalowych dachu opartych w połowie rozpiętości pomiędzy słupami środkowymi, zaprojektowano belkę żelbetową w poziomie głowic słupów. W poziomie stropu nad parterem zaplecza i pod parapetem okien zewnętrznych hali zaprojektowano belki podłużne, zmniejszające długości wyboczeniowe słupów. Ściany szczytowe hali posiadają konsytuację żelbetową, a wypełnienie murowane. Parcie wiatru przenoszą słupy żelbetowe, zamocowane wspornikowo w stopach fundamentowych oraz podparte w poziomie głowic belką żelbetową leżącą [5].

Zaplecze hali zostało wzniesione w układzie konstrukcyjnym mieszanym (żelbetowe słupy, belki, płyty). Ściany zewnętrzne oraz część ścian wewnętrznych zostały zaprojektowane jako murowane z pustaków z ceramiki poryzowanej. Dach zaplecza wykonano na więźbie drewnianej. Krokwie oparte są na murłatach oraz na płatwi, która podparta jest mieczami oraz słupem, spoczywającym na podwalinie. Konstrukcję łącznika stanowią ramy stalowe stężone elementami drewnianymi, wypełnionymi termoizolacją. Strop nad zapleczem zaprojektowano jako żelbetowy.



Fot. 1. Widok hali sportowej przy budynku Zespołu Szkół Ekonomicznych w Nowym Targu od strony południowo-zachodniej, fot. M. Krupa 04.2012

Photo 1. View of sports hall by the building of Economic Schools Complex in Nowy Targ from the south-west, photo M. Krupa 04.2012



Fot. 2. Widok hali sportowej przy budynku Zespołu Szkół Ekonomicznych w Nowym Targu od strony południowo-zachodniej, fot. M. Krupa 04.2012

Photo 2. View of sports hall by the building of Economic Schools Complex in Nowy Targ from the south-west, photo M. Krupa 04.2012

Jak wspomniani wyżej nowa hala sportowa jest skomunikowana z budynkiem szkoły łącznikiem, które konstrukcję nośną stanowią dwuteowniki. Pomiedzy dwuteownikami zaprojektowano ruszt wsporczy z krawędziaków drewnianych dla mocowania warstw wykończeniowych. Ramy nośne oparto na żelbetowych słupkach fundamentowych, połączonych żelbetową podwaliną.

W tradycyjnym budownictwie regionu architektura, której głównym przejawem były domy mieszkalne i budynki gospodarcze wynikała wprost z połączenia funkcji i konstrukcji. Analogicznie została sformułowana architektura wyżej opisanej hali. Konstrukcja zapewniająca odpowiednią kubaturę do zrealizowania założeń funkcjonalnych oraz zapewniająca odpowiednie działanie obiektu z uwzględnieniem warunków klimatycznych oraz zasad projektowania budynków energooszczędnych ukształtowała formę i zasadniczy wyraz architektoniczny hali z zapleczem. Przyjęta konstrukcja dachu sali gimnastycznej pozwoliła na ukształtowanie okapów wysuniętych kilka metrów poza lico ścian zewnętrznych. Od strony południowej okap tworzy żaluzje, przepuszczające promienie słoneczne do wnętrza hali w miesiącach zimowych i zapobiegające przegrzewaniu wnętrza w lecie.



Fot. 3. Widok hali sportowej przy budynku Zespołu Szkół Ekonomicznych w Nowym Targu od strony południowej, fot. M. Krupa, 04.2012

Photo 3. View of sports hall by the building of Economic Schools Complex in Nowy Targ from the south, photo M. Krupa 04.2012



Fot. 4. Widok hali sportowej przy budynku Zespołu Szkół Ekonomicznych w Nowym Targu od strony południowo-wschodniej, fot. M. Krupa, 04.2012

Photo 4. View of sports hall by the building of Economic Schools Complex in Nowy Targ from the south-east, photo M. Krupa 04.2012

Drugim obiektem, który stanowi ciekawy przykład obrazujący zagadnienia niniejszego artykułu jest hala sportowa przy L.O. im. E. Romera w Rabce-Zdroju. Budynek został zlokalizowany obok istniejącego obiektu liceum. Zadanie projektowe było skomplikowane ze względu na fakt, że wcześniej wykonano już część podziemną (piwnicę), do której musiał być dostosowany projekt. Prócz budynku nowej hali sportowej przedmiotowa inwestycja dotyczyła także połączonego z halą budynku dydaktycznego oraz łącznika komunikacyjnego zlokalizowanego między nowym, a starym obiektem [6].

Konstrukcję budynku hali stanowi płaski układ ramowy w rozstawie osiowym $l_0 = 6,0$ m składający się z dwóch słupów utwierdzonych w fundamentach i przegubowo opartego rygla drewnianego, klejonego, dwuspadowego z zabudowanym stalowym ściągiem. Ściany zewnętrzne są murowane i usztywnione poziomymi ryglami opartymi na słupach ram. W ścianie zewnętrznej szczytowej po stronie północno – wschodniej zabudowano trzy słupy utwierdzone w fundamencie i przegubowo oparte na poziomej belce na wysokości węzła ramy stanowiące podparcie dla poziomych rygli żelbetonowych ściany oraz usztywnienie jej. Posadowienie słupów ram hali zaprojektowano na stopach żelbetonowych monolitycznych wylewanych na mokro. Konstrukcja nośna hali to płaski układ ramowy w rozstawie osiowym $l_0 = 6,0$ m, składający się z dwóch słupów utwierdzonych w fundamentach i przegubowo opartego rygla drewnianego / klejonego / dwuspadowego z zabudowanym stalowym ściągiem. Na słupach ram w ścianach podłużnych oparte są belki podwalinowe i rygle pośrednie stanowiące oparcie i usztywnienie dla murów zewnętrznych. Elementy te są monolitycznie połączone z konstrukcją słupów. Na słupach ram oparty przegubowo jest drewniany rygiel, wykonany jako element klejony. Na ryglu ram oparte są pła-

twie klejone, stanowiące podpory dla przekrycia dachu. Ściany poprzeczne hali zaprojektowane zostały jako murowane. Ściana szczytowa zewnętrzna po stronie północno – wschodniej zaprojektowana została jako szkieletowa murowana. Szkielet ściany to układ słupowo – ryglowy żelbetowy monolityczny. Słupy zaprojektowano jako utwierdzone w fundamencie i oparte przegubowo na poziomym ryglu zabudowanym w poziomie węzłów ramy. Pod ścianą zaprojektowano belki podwalinowe żelbetowe monolitycznie połączone ze słupami. Wypełnienie ścian wykonane z pustaków ceramicznych typu „Max” Ścianę szczytowa zewnętrzną, dylatacyjną po stronie południowo – zachodniej zaprojektowano również jako szkieletową murowaną. Słupy ściany oparto na belce podwalinowej wykonanej na istniejącej odsadce fundamentu płytowego budynku dydaktycznego [7].

Dach hali jest dwuspadowy, przekryty blachodachówką. Jego konstrukcję nośną stanowi drewniany, klejony rygiel dachowy ze ściągami. Na ryglu oparte są również drewniane klejone płatwie.

W tym przypadku odniesień architektonicznych poszukiwano w zabudowie uzdrowskiej a nie jak w pierwszym przykładzie, w pierwotnej zabudowie mieszkalno-gospodarczej Podhala. Budynek dydaktyczny właściwie stanowi kontynuację willi "Jaworzyna", mieszczącej starszą część liceum. Tu konstrukcja została całkowicie podporządkowana architekturze i nieco ukryta. W hali elementy konstrukcyjne wykonane z drewna klejonego do pewnego stopnia mają przywoływać skojarzenia z tradycyjnym budownictwem regionu pozwalając jednocześnie na przekrycie znacznej rozpiętości.



Fot. 5. Widok hali sportowej przy budynku L.O. im. E. Romera w Rabce-Zdroju od strony zachodniej, fot. M. Krupa 06.2010

Photo 5. View of sports hall by E. Romer Secondary School in Rabka-Zdrój from the west, photo M. Krupa 06.2010



Fot. 6. Widok wnętrza hali sportowej przy budynku L.O. im. E. Romera w Rabce-Zdroju, fot. M. Krupa 06.2010

Photo 6. View of interior of sports hall by E. Romer Secondary School in Rabka-Zdrój from the west, photo M. Krupa 06.2010

Trzecią halą sportową wartą zaprezentowania jest hala przy Zespole Szkół, również w Rabce-Zdroju (fot. 7-8). Inwestycja polegała na budowie hali z zapleczem oraz łącznika komunikacyjnego, łączącego nowy budynek z istniejącą szkołą. Działka, na której ma zostać wzniesiona hala jest zlokalizowana przy ul. Kościuszki, która wznosi się od Al. Jana Pawła II w kierunku góry Bani. Teren ten jest trudny ze względu na ukształtowanie oraz bliskie sąsiedztwo lasu, co wymusiło zastosowanie niestandardowych rozwiązań konstrukcyjnych (realizacja muru oporowego) oraz tych, związanych z ochroną przeciwpożarową.

Budynek hali sportowej z zapleczem o wymiarach zewnętrznych w rzucie 31,37 x 25,00 m (powierzchnia użytkowa: 722,97m²) oraz wysokości 15,00 m będzie zlokalizowany w południowo-zachodniej części działki. Podłużna oś sali gimnastycznej została zorientowana w kierunku pd-wsch – pn-zach. Prostopadle do podłużnej osi sali, ze wschodniego narożnika zaplecza wyprowadzony jest łącznik komunikacyjny o wysokość 3,86 m, który łączy się z istniejącym budynkiem w jego zachodnim narożniku. Pomiedzy projektowanym budynkiem hali z zapleczem a łącznikiem komunikacyjnym zostało zaprojektowane trawiaste boisko szkolne o wymiarach 22,7x13,1m. Zaplecze hali stanowią dwa zespoły szatniowe, z których jeden posiada sanitariaty spełniające wymogi dostępności dla osób niepełnosprawnych. Ponadto zostało zaprojektowane pomieszczenie dla trenera z niezależnym pomieszczeniem higieniczno-sanitarnym. Koło wewnętrznej klatki schodowej znajduje się pomieszczenie porządkowe. Pomiedzy szatnią a klatką schodową prowadzącą na antresolę zlokalizowany został magazyn, dostępny również z boiska na zewnątrz budynku. Istniejący budynek Zespołu Szkół połączony został z projektowaną salą łącznikiem komunikacyjnym. Istniejący otwór okienny w holu „starego” budynku został przebudowany na drzwi prowadzące do łącznika komunikacyjnego [8].

Wyraz estetyczny budynku podkreślają projektowane materiały wykończeniowe – w naturalnych kolorach – drewno, blacha tytanowo-cynkowa, tynk (nawiązujący kolorem do surowego betonu – współczesnego kamienia).

Cały obiekt będzie posadowiony na żelbetowych ławach i ścianach fundamentowych. Konstrukcja hali to układ stalowych wiązarów dachowych opartych na żelbetowych słupach. Wypełnienie ścian zewnętrznych stanowią pustaki z ceramiki poryzowanej. Zaplecze będzie wzniesione w układzie konstrukcyjnym mieszanym (żelbetowe słupy, belki, płyty). Ściany zewnętrzne oraz część ścian wewnętrznych zostały zaprojektowane jako murowane z pustaków z ceramiki poryzowanej. Dach zaplecza wykonany będzie na więźbie drewnianej. Konstrukcję łącznika stanowią ramy stalowe stężone elementami drewnianymi – wypełnienie stanowi termoizolacja [9].

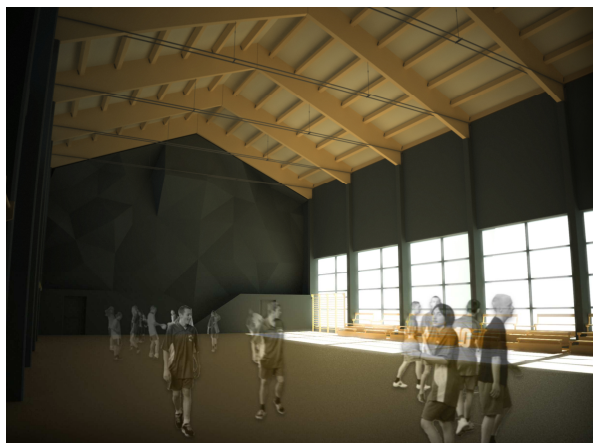
Budynek będzie energooszczędny. Współczynniki przenikania ciepła przez przegrody przekraczają obowiązujące normy przynajmniej o 40%. Uzyskano to poprzez zastosowanie w projekcie materiałów termoizolacyjnych wysokiej jakości. Okna i drzwi również dobrane zostały pod kątem możliwie wysokiej izolacyjności cieplnej. Ukształtowanie bryły budynku również minimalizuje straty energii. Wykorzystanie naturalnego materiału jakim jest drewno do wykończenia wnętrza oraz elewacji sali gimnastycznej oraz częściowo do stworzenia konstrukcji przyczynia się do ograniczenia szkodliwych substancji towarzyszących produkcji przemysłowej innych materiałów wykorzystywanych do tych celów.

W tym projekcie elementy konstrukcyjne miały wpływ nie tylko na architekturę obiektu ale ukształtowały wygląd niemalże całej działki. Stając na terenie przy nowoprojektowanej części zespołu widzimy przede wszystkim przestrzeń zamkniętą pomiędzy uniesioną, wspartą na słupach halą a wysokim na kilka metrów murem oporowym. W ogólnym odbiorze zewnętrznym konstrukcja dominuje.



Fot. 7. Widok hali sportowej przy budynku Zespołu Szkół w Rabce-Zdroju, wizualizacja, proj. Grupa Projektowa ZERIBA, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.

Photo. 7. View of sports hall by the object of the School Complex in Rabka-Zdrój, visualization, designed by Grupa Projektowa ZERIBA, [in:] Archive GP ZERIBA, s.v.



Fot. 8. Widok wnętrza hali sportowej przy budynku Zespołu Szkół w Rabce-Zdroju, wizualizacja, proj. Grupa Projektowa ZERIBA, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.

Photo. 8. View of interior of sports hall by the object of the School Complex in Rabka-Zdrój, vizualization, designed by Grupa Projektowa ZERIBA, [in:] Archive GP ZERIBA, s.v.

Ostatnią z prezentowanych hal jest hala sportowa, która została zaprojektowana przy Specjalnym Ośrodku Szkolno-Wychowawczym w Nowym Targu (fot. 9-10). Budynek hali wraz z magazynem, salą treningową (siłownią), pomieszczeniem dla trenerów, salą rehabilitacyjną, zapleczem higieniczno-sanitarnym oraz łącznikiem komunikacyjnym z istniejącym budynkiem szkoły o powierzchni użytkowej 3218,94 m² powstanie we wschodniej części działki. Zaproponowany układ przestrzenny kontynuuje i uzupełnia ład stworzony przez istniejącą zabudowę. Elementy projektowanego budynku ustawione są ortogonalnie z zachowaniem kierunków północ-południe, wschód-zachód. Hala wraz z zapleczem oraz łącznikiem tworzą wraz z istniejącym budynkiem szkoły atrium, w którym zaprojektowano boisko zewnętrzne z nawierzchnią syntetyczną imitującą trawę. Projektowany budynek ma przede wszystkim stanowić zaplecze sportowo-rekreacyjne dla uczniów Specjalnego Ośrodka Szkolno-Wychowawczego w zakresie podstawowych form rehabilitacji ruchowej. Potencjał tego obiektu jest jednak znacznie większy i może pełnić powyższą funkcję także dla użytkowników spoza SOSW.

Forma hali sportowej wyniknęła z wymogów związanych z polami gry dyscyplin, do uprawiania których sala została przystosowana oraz dążenia do ograniczenia zbędnej kubatury w jej wnętrzu. Ponadto forma ta stanowi atrakcyjny element przestrzenny przełamujący monotonię całego zespołu. Budynek przykryty będzie dachem łukowym, geometrycznie, składającym się z 2 symetrycznych łuków w części dolnej konstrukcji o promieniu $r = 11,79$ m oraz 1 łuku w części środkowej o promieniu $r = 25,36$ m. Wymiary wewnętrzne samej hali to 50 m długości i przeszło 35 m szerokości [10].



Fot. 9. Widok hali sportowej przy Specjalnym Ośrodku Szkolno-Wychowawczym w Nowym Targu, wizualizacja, proj. Grupa Projektowa ZERIBA, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.

Photo. 9. View of sports hall by Special Needs Center in Nowy Targ, visualization, designed by Grupa Projektowa ZERIBA, [in:] Archive GP ZERIBA, s.v.



Fot. 10. Widok wnętrza hali sportowej Specjalnym Ośrodku Szkolno-Wychowawczym w Nowym Targu, wizualizacja, proj. Grupa Projektowa ZERIBA, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.

Photo. 10. View of interior of sports hall by Special Needs Center in Nowy Targ, visualization, designed by Grupa Projektowa ZERIBA, [in:] Archive GP ZERIBA, s.v.

Układ konstrukcyjny hali stanowi układ więźarów i płatwi wykonanych z drewna klejonego [11]. Więzary zamocowane są w żelbetowych stopach fundamentowych natomiast ściany szczytowe hali wzniesione zostaną w formie przestrzennej konstrukcji żelbetowej (układ słupów, belek i rygli). Ściany szczy-

towe hali zaprojektowano jako żelbetowe monolityczne wylewane na mokro. Konstrukcję szkieletu ściany szczytowej stanowi żelbetowy monolityczny układ słupa dwu gałęziowego.

Wnętrze hali w zasadzie wyłącznie kształtuje konstrukcja. Od głównych więzarów stanowiących konstrukcję nośną obiektu po ruszt, do którego mocowane są elementy poszycia hali. Zasadniczy kształt przekroju poprzecznego hali oraz decyzja o nie zasłanianiu wyżej opisanych elementów konstrukcyjnych poza ciekawym efektem wizualnym okazała się również korzystna pod względem warunków akustycznych panujących wewnątrz obiektu [12].

Podsumowanie

Wspólną cechą opisanych wyżej projektów hal sportowych było założenie związane z uzyskaniem możliwie dużej przestrzeni do uprawiania sportu o możliwie najwyższym standardzie. Hala przy ul. Kościuszki w Rabce-Zdroju już na etapie przygotowania działki do rozpoczęcia realizacji samego obiektu wymagała zastosowania nietypowych elementów konstrukcyjnych jakim nie wątpliwie jest sporej wysokości mur oporowy. Niejako na przeciwnym biegunie tego zestawienia jest przykład hali przy ul. Jana Pawła II w Nowym Targu, której działka, jak na warunki Podhala jest w zasadzie płaska ale w związku z tym program funkcjonalno-przestrzenny przyjęty przez Inwestora był niezwykle ambitny co znalazło odbicie w dużych rozmiarach zaprojektowanego obiektu. Pomimo zróżnicowanych elementów determinujących przyjęte rozwiązania projektowe we wszystkich przykładach powstały układy konstrukcyjne podkreślające lub wręcz kreujące walory architektoniczne obiektów.

Literatura

- [1] Kuśnierz-Krupa D.: New building technologies in the context of revalorization of a historic building (on the example of conversion of an old dormitory into an administrative office), "Czasopismo Techniczne - Architektura, Technical Transactions - Architecture, Wyd. PK, Kraków 2014, nr 7-A/2014, s. 123-131.
- [2] Teka architektury współczesnej ziem górskich, T. P. Szafer (red.), Wyd. Sen.On, t. 1, Kraków 1993 oraz Teka architektury współczesnej ziem górskich, T. P. Szafer (red.), Wyd. Sen.On, t. 2, Kraków 1996.
- [3] Wesołowski Ł.: Elementy budowlane zaprojektowane dla konstrukcji/wykończenia budynków pasywnych i energooszczędnych, „Czasopismo Techniczne”, nr 8-A/2010, Wyd. PK, Kraków 2010, s. 213-220.
- [4] Projekt architektoniczny bud.-wyk. hali sportowej przy budynku Zespołu Szkół Ekonomicznych w Nowym Targu, ul. Kowaniec 125, Grupa Projektowa ZERIBA, Kraków 2012, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.
- [5] Projekt konstrukcyjny bud.-wyk. hali sportowej przy budynku Zespołu Szkół Ekonomicznych w Nowym Targu, ul. Kowaniec 125, JK PROJEKT Firma Projektowo Usługowa – Jan Kowalski, Kraków 2012, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.

- [6] Projekt architektoniczny bud.-wyk. hali sportowej przy L.O. im. E. Romera w Rabce-Zdroju, ul. Jana Pawła II 41, Grupa Projektowa ZERIBA, Kraków 2008, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.
- [7] Projekt konstrukcyjny bud.-wyk. hali sportowej przy L.O. im. E. Romera w Rabce-Zdroju, ul. Jana Pawła II 41, JK PROJEKT Firma Projektowo Usługowa – Jan Kowalski, Kraków 2008, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.
- [8] Projekt architektoniczny bud.-wyk. hali sportowej przy Zespole Szkół w Rabce-Zdroju, ul. Kościuszki 9, Grupa Projektowa ZERIBA, Kraków 2011, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.
- [9] Projekt konstrukcyjny bud.-wyk. więźby hali sportowej przy Specjalnym Ośrodku Szkolno-Wychowawczym w Nowym Targu, al. Jana Pawła II 85, MTM „Projekt”, Kraków 2010, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.
- [10] Projekt architektoniczny bud.-wyk. hali sportowej przy Specjalnym Ośrodku Szkolno-Wychowawczym w Nowym Targu, al. Jana Pawła II 85, Grupa Projektowa ZERIBA, Kraków 2010, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.
- [11] Projekt konstrukcyjny bud.-wyk. więźby hali sportowej przy Specjalnym Ośrodku Szkolno-Wychowawczym w Nowym Targu, al. Jana Pawła II 85, MTM „Projekt”, Kraków 2010, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.
- [12] Projekt konstrukcyjny bud.-wyk. hali sportowej przy Zespole Szkół w Rabce-Zdroju, ul. Kościuszki 9, Pracownia projektowania konstrukcji i nadzoru budowlanego Jan Baran, Skawina 2011, [w:] Archiwum GP ZERIBA, s.v.

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE OF SPORTS HALLS IN THE PODHALE REGION (ON SELECTED EXAMPLES)

Summary

This article concerns the issue of construction and architecture of four selected sports halls in the Podhale region. Two of them are situated in Nowy Targ: the first by the building of Economic Schools Complex in Kowaniec Street; the second by Special Needs Center in Jana Pawła II Street. The next two are objects designed in Rabka-Zdrój: one is located by E. Romer Secondary School, and the other by the School Complex in Kosciuszko Street. Because the discussed objects are situated in the Podhale region, the local climate and the lie of the land enforced the use of non-standard technological solutions in the projects, especially construction solutions which are worth describing. In all four cases construction significantly influenced architecture, and the degree of this influence was determined by location and functional principles to varying extent.

Keywords: hala sportowa, Podhale, Rabka Zdrój, Nowy Targ

Przestano do redakcji: 2.10.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Halina GARBALIŃSKA¹
Magdalena BOCHENEK²

OCENA MOŻLIWOŚCI WYZNACZANIA IZOTERM SORPCJI DYNAMICZNĄ METODĄ DVS – NA PRZYKŁADZIE BETONU KOMÓRKOWEGO KLASY 700

Artykuł prezentuje ocenę porównawczą dynamicznej metody wyznaczenia izoterm sorpcji (DVS) oraz tradycyjnej metody pomiarowej (TM). Problem omówiono na przykładzie betonu o gęstości 700 kg/m^3 , przedstawiając uzyskane dla tego materiału wyniki badań. Wyznaczono izotermę sorpcji metodą tradycyjną z zastosowaniem nasyconych wodnych roztworów soli oraz metodą zautomatyzowaną z wykorzystaniem urządzenia generującego wilgotność. Porównując czas trwania i nakład pracy przy realizacji obydwu eksperymentów stwierdza się występowanie znaczących różnic. Wyznaczenie izoterm sorpcji metodą tradycyjną trwało 10 miesięcy i było poprzedzone intensywną pracą związaną z przygotowaniem eksperymentu. Natomiast pomiar urządzeniem DVS dla 1 próbki trwał około 1 doby i nie wymagał specjalnego przygotowania próbek oraz wykonywania roztworów. Czas tego typu pomiarów został skrócony z wielu miesięcy do kilkunastu godzin. Wyniki zebrane obydwoma metodami odznaczają się bardzo dobrą zgodnością w zakresie wilgotności względnych powietrza od 0% do 75÷85%. Natomiast w zakresie wysokich wilgotności od 75÷85% do 98% zdiagnozowano występowanie znaczących różnic w przebiegach izoterm sorpcji wyznaczonych przy pomocy obydwu metod. Zrealizowane dwa bloki eksperymentalne pozwalają stwierdzić, że w przypadku testowanego betonu komórkowego, szybka metoda pomiarowa DVS może być stosowana do diagnostyki wilgotnościowej oraz wyznaczenia izoterm sorpcji w szerokim zakresie wilgotności, z wyłączeniem jednak zakresu ponadkrytycznego.

Słowa kluczowe: izotermę sorpcji, beton komórkowy, tradycyjna metoda wyznaczenia izoterm, dynamiczna metoda wyznaczenia izoterm, DVS

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Halina Garbalińska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 48 29, e-mail: Halina.Garbalińska@zut.edu.pl

² Magdalena Bochenek, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 45 14, e-mail: Magdalena.Bochenek@zut.edu.pl

1. Wstęp

Izotermy sorpcji opisują związek między stabilizującą się w danym materiale zawartością wilgoci i wilgotnością panującą w jego otoczeniu. Izotermy sorpcji umożliwiają określenie: zdolności materiału do chłonięcia wody, krytycznej zawartości wilgoci, charakterystyki mikrostruktury, a przede wszystkim równowagowej wilgotności materiału, odpowiadającej danej temperaturze i wilgotności względnej powietrza.

Metody wyznaczania izoterm sorpcji można generalnie podzielić na statyczne i dynamiczne. Tradycyjną metodą badania sorpcji materiałów budowlanych jest grawimetryczna metoda statyczna, opisana m.in. w normie europejskiej [4] oraz normie amerykańskiej [1]. Obydwie normy podają dwie alternatywne metody określania właściwości sorpcyjnych porowatych materiałów budowlanych: z zastosowaniem eksykatorów oraz z zastosowaniem komory klimatycznej. Zalecana temperatura badań to 23°C – dla warunków standardowych oraz 27°C – dla warunków tropikalnych.

Metodą alternatywną do metody tradycyjnej jest metoda zautomatyzowana wykorzystująca urządzenia generujące wilgotność, jak np. Dynamic Vapor Sorption (DVS). Instrumenty te bazują na strategii nazywanej dm/dt (procentowa zmiana masy w funkcji czasu) pozwalającej ustalić, czy poziom równowagi został osiągnięty. Wartość dm/dt jest obliczana w oparciu o pomiar masy z ostatnich minut eksperymentu. Gdy dm/dt jest bliskie zero oznacza to, że próbka zbliża się do osiągnięcia stanu równowagi.

Wiarygodność pomiarów tym urządzeniem potwierdzają badania prowadzone w innych gałęziach przemysłu, m.in. farmaceutycznym, spożywczym, tekstylnym. Stwierdza się jednak brak usystematyzowanych badań porównawczych metody tradycyjnej z metodą zautomatyzowaną w odniesieniu do materiałów budowlanych. W toku studiów literatury znaleziono jedynie nieliczne dane odnoszące się do badań porowatych materiałów budowlanych.

2. Opis procedury badawczej

2.1. Metoda tradycyjna

Badania izoterm sorpcji metodą tradycyjną przeprowadzono na prostopadłościennych próbkach betonu komórkowego klasy 700 kg/m³ o wymiarach powierzchni czołowych 6x12 cm i grubości ok. 1 cm. W pierwszej kolejności zinventaryzowano próbki pod względem wymiarów geometrycznych, a następnie wysuszone je w suszarce do stałej masy w temperaturze 105°C. Po wysuszeniu próbki zważono na wadze o dokładności ±0,001 grama, a następnie zaizolowano na pobocznicach i ponownie dosuszono do stałej masy w suszarce w 105°C.

W międzyczasie przygotowano roztwory higrostatyczne, przewidziane do późniejszego stabilizowania wilgotności względnych powietrza ϕ . Na podstawie

literatury (np. [2]) wybrano następujące sole: LiCl, MgCl₂, Mg(NO₃)₂, NaNO₂, NaCl, KCl, K₂SO₄, których wodne roztwory nasycone stabilizują wilgotność względną na poziomie: 11, 33, 54, 65, 75, 85, 98%, w temperaturze 20°C.

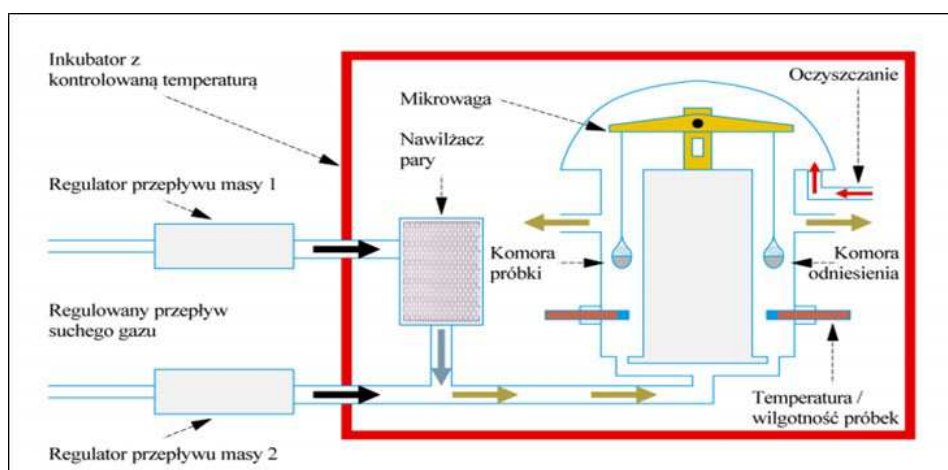
Poszczególne roztwory umieszczono na dnie specjalnie przygotowanych szczelnych pojemników, pełniących rolę eksekatorów. Następnie umieszczono w pojemnikach stelaże, a w nich po 4 próbki. Całe układy ulokowano w komorze termostatycznej, ustawionej na temperaturę 20°C.

Pomiary sorpcji polegały na rejestracji zmian zwiększającej się masy próbek. Procesy sorpcji zainicjowano wprowadzeniem suchych próbek w kontakt z powietrzem o różnym poziomie zawilgocenia. Odbywały się one według schematu: 0→11%, 0→33%, 0→54%, 0→65%, 0→75%, 0→85%, 0→98%. Początkowo pomiary wykonywano co 6 godzin, następnie co 12 godzin. Po spowolnieniu procesu sorpcji, próbki ważono co dwie doby, stopniowo wydłużając przerwy między pomiarami. Cały eksperyment trwał w sumie 10 miesięcy.

2.2. Metoda DVS

Ze względu na długi czas i duży nakład pracy, jakie wymagane są przy wyznaczaniu izoterm sorpcji tradycyjnymi metodami grawimetrycznymi, zdecydowano się przeprowadzić drugi eksperyment techniką DVS. Ideę pomiaru sorpcji za pomocą urządzenia DVS zilustrowano na rysunku 1. Schematyczny model oraz jego opis sporządzono na podstawie instrukcji obsługi aparatu przekazanej przez jego producenta.

Z wnętrza bloków testowanej klasy betonu komórkowego wycinano próbki sześciennie o wymiarach 0,2x0,2x0,2 cm, każda o masie ok. 10 mg. Badania wykonywano w temperaturze 20°C i zakresie wilgotności względnych



Rys. 1. Schemat pomiaru realizowanego techniką DVS, na podstawie [5]

Fig. 1. Measurement scheme of the DVS technique, based on [5]

powietrza 0÷98%. Ustawiono skokowe zmiany wilgotności co ok. 10% i rejestrację zmian masy co 1 minutę. Za pomocą komputera sprzężonego z urządzeniem rejestrowano zmiany masy w każdym kroku pomiarowym. Zawsze kiedy program wykrywał zmianę masy mniejszą niż 0,002% na minutę zmieniała się automatycznie wilgotność o ok. 10%. Pomiar sorpcji jednej próbki, pozwalający odtworzyć przebieg całej izotermy, trwał około 1 doby.

3. Wyniki badań

3.1. Izotermy sorpcji wyznaczone metodą tradycyjną

Po osiągnięciu stanu równowagowego w każdym z badanych zakresów wilgotności określano masową zawartość wilgoci w materiale U_m [%] ze wzoru:

$$U_m = \left(\frac{m_w - m_s}{m} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: m_w oznacza masę zaizolowanej próbki w stanie równowagi wilgotnościowej, m_s to masa zaizolowanej próbki wysuszonej do stałej masy, zaś m oznacza masę suchej próbki bez izolacji. Dokonano tu rozróżnienia między m_s a m , aby odnieść realną zawartość wody ($m_w - m_s$) do masy rdzennego materiału m , tj. betonu komórkowego pozbawionego izolacji na pobocznicy.

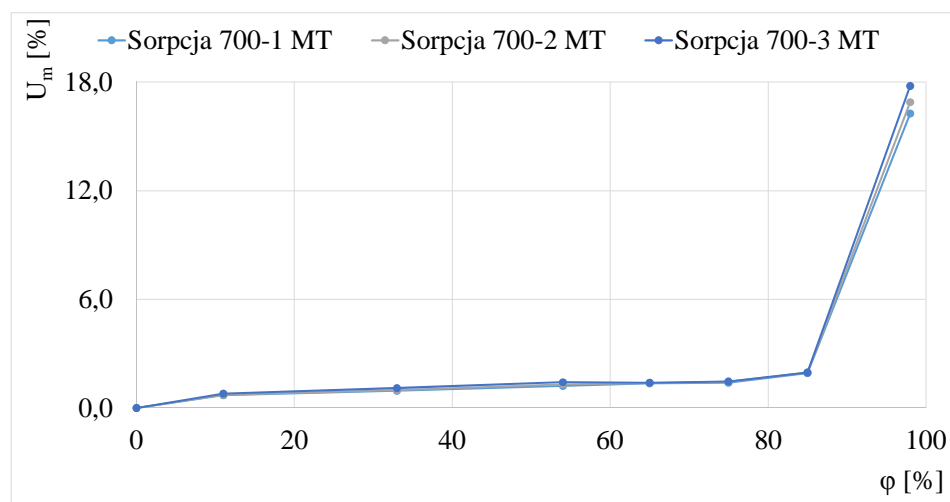
W tabeli 1 przedstawiono wyniki pochodzące z pomiarów sorpcji metodą tradycyjną, uzyskane na trzech próbkach betonu komórkowego klasy 700.

Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono izotermy sorpcji, które zestawiono na rys. 2. Widać, że zależność $U_m = f(\varphi)$ cechuje się stosunkowo nieznacznym przyrostem wartości przy $\varphi < 85\%$ i gwałtownym wzrostem przy $\varphi > 85\%$, dającym niemal 9-krotny przyrost wilgotności równowagowej U_m .

Tabela 1. Wyniki badań sorpcji betonu komórkowego klasy 700, uzyskane metodą tradycyjną

Table 1. Sorption test results of autoclaved aerated concrete class 700, obtained using the traditional method

Zakres $\Delta\varphi$ [%]	U_m [%] 700/1	U_m [%] 700/2	U_m [%] 700/3
0 - 11	0,700	0,734	0,790
0 - 33	0,947	0,992	1,108
0 - 54	1,224	1,309	1,430
0 - 65	1,363	1,377	1,397
0 - 75	1,388	1,442	1,461
0 - 85	1,937	1,973	1,973
0 - 98	16,262	16,888	17,788



Rys. 2. Izotermy sorpcji betonu komórkowego klasy 700 wyznaczone metodą tradycyjną

Fig. 2. Sorption isotherms of AAC class 700 determined by traditional method

3.2. Izotermy sorpcji wyznaczone techniką DVS

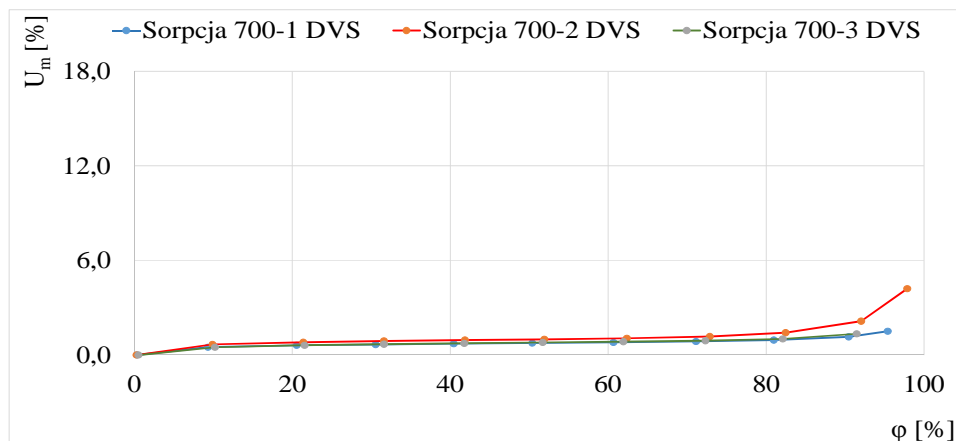
W tabeli 2 przedstawiono wyniki pochodzące z pomiarów sorpcji techniką DVS, dotyczące trzech próbek analizowanego betonu komórkowego klasy 700.

Tabela 2. Wyniki badań sorpcji betonu klasy 700, uzyskane za pomocą DVS

Table 2. Sorption test results of AAC class 700, obtained using the DVS device

φ [%]	U _m [%] 700/1	φ [%]	U _m [%] 700/2	φ [%]	U _m [%] 700/3
0,3	0,001	0,3	0,001	0,5	0,001
9,3	0,498	9,9	0,679	10,2	0,498
20,5	0,608	21,4	0,807	21,5	0,615
30,6	0,670	31,6	0,891	31,6	0,687
40,4	0,712	41,8	0,944	41,8	0,745
50,4	0,758	51,9	0,995	51,7	0,795
60,7	0,801	62,4	1,064	61,9	0,848
71,1	0,855	72,9	1,178	72,3	0,913
81,0	0,944	82,5	1,418	82,1	1,021
90,5	1,157	92,0	2,153	91,5	1,347
95,4	1,513	97,9	4,214	96,4	2,020

Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono izotermy sorpcji, które zestawiono na rys. 3. Odtworzone funkcje $U_m = f(\varphi)$ cechują się umiarkowanym wzrostem wartości w przedziale $\varphi \approx 0 - 80\%$ oraz nieco intensywniejszym wzrostem (od 1,6 do 3,0 razy) w zakresie najwyższych wilgotności.

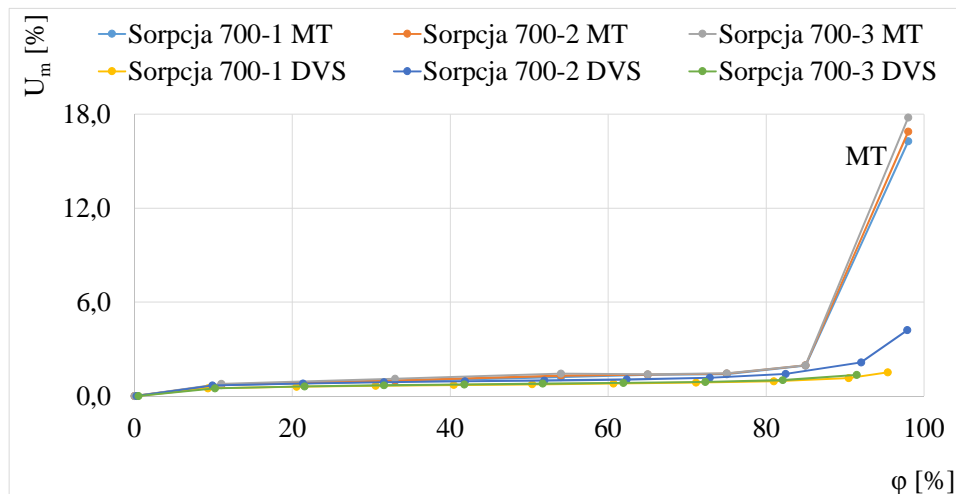


Rys. 3. Izotermy sorpcji betonu komórkowego klasy 700, wyznaczone metodą DVS

Fig. 3. Sorption isotherms of AAC class 700, determined by DVS method

4. Podsumowanie

Na rysunku 4 zestawiono wykresy izoterm sorpcji betonu komórkowego klasy 700, wyznaczone dwiema różnymi metodami.



Rys. 4. Izotermy sorpcji betonu komórkowego klasy 700 wyznaczone metodami DVS oraz MT

Fig. 4. Sorption isotherms of autoclaved aerated concrete class 700 determined by DVS and MT methods

Na rysunku 4 oznaczono wyniki uzyskane metodą tradycyjną jako MT, zaś metodą zautomatyzowaną jako DVS.

Można stwierdzić bardzo dobrą zgodność wyników uzyskanych dwoma testowanymi metodami w zakresie wilgotności względnych powietrza do 75÷85%. Jednak przy wilgotnościach obejmujących zakres od 75÷85% do 98% różnice w wynikach badań są bardzo duże. Tendencje te wykazują pełną analogię do wcześniej publikowanych danych dotyczących betonu komórkowego klasy 400 [3].

Porównując czas trwania i nakład pracy przy realizacji obydwu eksperymentów można zauważyć znaczące różnice. Wyznaczenie izoterm sorpcji metodą tradycyjną trwało 10 miesięcy i było poprzedzone intensywną pracą związaną z przygotowaniem badań. Natomiast pomiar urządzeniem DVS dla 1 próbki trwał około 1 doby bez konieczności specjalnego przygotowania próbek oraz roztworów. Czas tego typu pomiarów zostaje zredukowany z wielu miesięcy do kilkadziesiąt godzin.

Zatem niewątpliwą zaletą metody DVS jest bardzo krótki czas pomiaru oraz wyeliminowanie dużego nakładu pracy związanego z przygotowaniem badań oraz z późniejszym wielomiesięcznym ważeniem próbek. Możliwe jest to dzięki pełnej automatyzacji urządzenia i wykorzystaniu oprogramowania komputerowego. Dzięki wysokiej czułości i dokładności tych aparatów, rozmiary próbek mogą być niewielkie i dzięki temu osiągnięcie równowagi następuje o wiele szybciej. Ponadto w wyniku badań urządzeniem DVS uzyskuje się większą ilość punktów pomiarowych, niż w tradycyjnym badaniu.

Jednak metoda DVS nie kwalifikuje się do zastosowania w przypadku badanych materiałów w odniesieniu do wysokich wilgotności $\varphi > 75\div 85\%$, w których przekraczana jest już wilgotność krytyczna, a klasycznym procesom sorpcji towarzyszą procesy kondensacji kapilarnej.

Natomiast przeprowadzone badania wykazały, że obydwie metody wyznaczania izoterm sorpcji są kompatybilne w stosunkowo szerokim zakresie wilgotności względnej powietrza od 0% do 75÷85% i mogą być rekomendowane jako metody zamienne w badaniach materiałów budowlanych testowanego rodzaju w odniesieniu do tego zakresu zawilgocenia.

Literatura

- [1] ASTM C1498-04a: Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2010.
- [2] ASTM E104 – 02(2012) Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2012.
- [3] Bochenek M., Garbalińska H.: Ocena porównawcza techniki DVS i tradycyjnej metody wyznaczania izoterm sorpcji – na przykładzie betonu komórkowego klasy 400. *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, Tom VII, Nr 1 – 2015, s. 15-20.
- [4] PN-EN ISO 12571:2013: Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie właściwości sorpcyjnych. PKN, Warszawa, 2013.
- [5] Surface Measurement Systems: DVS Bedinungsanleitung. London, UK.

POSSIBILITIES EVALUATION OF DVS METHOD FOR SORPTION ISOTHERM DETERMINATION – EXAMPLIFIED BY AUTOCLAVED AERATED CONCRETE CLASS 700

Summary

This paper presents a comparative evaluation of the Dynamic Vapor Sorption method (DVS) and the traditional method (TM) to determine the sorption isotherms. The problem was discussed based on the example of autoclaved aerated concrete with a density of 700 kg/m^3 , followed by a presentation of the results obtained for this material. Sorption isotherms were determined by use of the traditional method applied with saturated water salt solutions and the automated method applying a humidity-generating device. Comparing the extent and the amount of work throughout the conducted research and the realization of both experiments, the significant differences between both methods became apparent. The process of determination of the sorption isotherms using the traditional method required 10 months and was preceded by an intensive preparation work. On the other hand, the measurement of each sample using the DVS required about 1 day without the need to specifically prepare the samples and solutions. The length of these measurements is reduced from several months to several hours. The results obtained using both methods indicate good compatibility in the case of all the tested concretes within the air humidity range from 0% to 75÷85%. In the case of high humidity ranges between 75÷85% and 98%, a significant course differentiation of the sorption isotherms was determined for both methods. The two conducted experimental blocks indicate that for the tested materials the quick DVS measurement method can be used to carry out moisture diagnostics and to determine sorption isotherms for a wide range of humidity, except, however, the supercritical range.

Keywords: sorption isotherms, autoclaved aerated concrete, traditional method, Dynamic Vapor Sorption method, DVS

Przesłano do redakcji: 27.05.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Henryk WACHTA¹
Krzysztof BARAN²
Marcin LEŚKO³

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA W PRACACH REWITALIZACYJNYCH ZAAWANSOWANYCH APLIKACJI GRAFICZNYCH

W klasycznym rozumieniu rewitalizacja obejmuje szereg działań zmierzających do przekształcenia na korzyść wyodrębnionego obszaru, który z różnych względów uległ degradacji. Kierunki tych przekształceń bywają różne, jednak w dużej mierze dotyczą obszarów historycznych, zniszczonych w czasie II Wojny Światowej. Współcześnie, na etapie planowania prac rewitalizacyjnych zabudowy historycznej, korzysta się z szeregu inżynierskich aplikacji graficznych, pozwalających wizualizować rozpatrywane koncepcje rewitalizacyjne. Dynamiczny postęp w rozwoju oprogramowania narzędziowego oraz możliwości obliczeniowych sprzętu komputerowego tworzy nową jakość w możliwościach wizualizacji obiektów architektonicznych. Celem podjętych i prezentowanych w artykule prac było ukazanie możliwości wykorzystania współczesnych, zaawansowanych aplikacji graficznych w pracach rewitalizacyjnych historycznej zabudowy Przemysła. Do prac szczegółowych wytypowano wstępnie dwa obiekty istniejące niegdyś w śródmieściu: kamienicę nr 4, usytuowaną przy Placu na Bramie oraz Pasaż Gansa położony przy ulicy Mickiewicza. Na bazie istniejącej dokumentacji fotograficznej – najczęściej pocztówek, odtworzono formę przestrzenną elewacji tych obiektów wraz z bogatym wystrojem architektonicznym. Korzystając z szerokiej możliwości modelowania cech powierzchni pokrywających elewacje oraz pokrycia dachowe, odwzorowano z dużym przybliżeniem stan materiałów ścian zewnętrznych i dachów rozpatrywanych obiektów. Wreszcie na etapie modelowania światła dziennego rozpatrzono dwa przypadki oświetlenia naturalnego: oświetlenie kierunkowe, występujące w porze bezchmurnej oraz rozproszone, występujące podczas jednorodnego zachmurzenia. Utworzone w toku pracy wizualizacje zostały naniesione na współczesne zdjęcia miejsc lokalizacji tych obiektów. Uzyskany efekt wizualny pozwala dokonać oceny trafności celu odtworzenia historycznych obiektów w otoczeniu współczesnej zabudowy oraz planować ich współczesną funkcję.

Słowa kluczowe: zabudowa historyczna, komputerowe odwzorowanie obiektów architektonicznych, narzędzia wizualizacyjne, modelowanie oświetlenia dziennego

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Henryk Wachta, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki, Elektroenergetyki i Systemów Złożonych, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651977; hwachta@prz.edu.pl

² Krzysztof Baran, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki, Elektroenergetyki i Systemów Złożonych, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów; tel. 177432434; kbaran@prz.edu.pl

³ Marcin Leško, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki, Elektroenergetyki i Systemów Złożonych, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów; tel. 177432434; mlesko@prz.edu.pl

1. Wprowadzenie

Według szacunków, w latach 1939-1945 w Przemyślu w wyniku działań wojennych zniszczeniu lub poważnemu uszkodzeniu uległo ok 50% zabudowy. Niektóre dzielnice, jak np. Dzielnica Żydowska, została zniszczona w 100% [1]. Poziom zniszczeń sytuuje Przemyśl obok Warszawy wśród najbardziej zniszczonych miast Polski. Z opracowań badaczy wynika, że w 1932 roku 30,1% budynków w Przemyślu należało do Żydów, a 69,4% do chrześcijan. Jednak w śródmieściu te proporcje przedstawiały się odwrotnie: 68,4% budynków należała do obywateli wyznania mojżeszowego, zaś 31,2% do obywateli wyznania rzymskokatolickiego. Oczywistym jest też, że przedstawiały one większą wartość historyczną i architektoniczną niż inne, położone w dzielnicach peryferyjnych [2]. Po wojnie miejscom tym przypisywano funkcje lokalnych parkingów, skwerów itp. Współcześnie w ramach uruchamianych szeroko prac rewitalizacyjnych można podjąć dyskusję nad ewentualnością odtworzenia tych obiektów. W ramach zespołu autorskiego podjęto próbę zaprezentowania użyteczności narzędzi informatycznych w komputerowym odtworzeniu dwu wybranych, historycznych obiektów śródmieścia Przemyśla [3]. Wzrost użyteczności przedstawiono na poziomie zdolności odwzorowania siatki przestrzennej obiektu, wizualizowania cech materiałów pokrywających elewacje obiektów rzeczywistych oraz oddziaływania oświetlenia dziennego na obiekt oraz jego bezpośrednie otoczenie. Do prac szczegółowych wybrano kamienicę Rosiewicza nr 4 oraz Pasaż Gansa. Oba obiekty zlokalizowane były przy ulicy Mickiewicza w Przemyślu.

2. Komputerowe odwzorowanie kamienicy Rosiewicza nr 4, usytuowanej przy Placu na Bramie w Przemyślu

Kamienica usytuowana była w ciągu zabudowy, przy wylocie ulicy Mickiewicza w stronę Placu na Bramie (rys. 1). Był to dwupiętrowy, bardzo atrakcyjny architektonicznie obiekt z poddaszem i czterema bogato zdobionymi balkonami. Fasadę oraz motywy dekoracyjne umieszczone na konsolach oraz na płycinach cechowała symetria [9]. Kamienica została zniszczona 8 września 1939 r. w wyniku nalotów lotnictwa niemieckiego. Poziom zniszczeń był tak duży, iż nie zdecydowano się na jej odbudowę, i poddano całkowitej rozbiórce (rys. 2). Współcześnie miejsce to jest niezabudowane, tworząc mało estetyczną lukę w ciągu historycznych kamienic.



Rys. 1. Historyczna pocztówka z widokiem na dawny Plac Fiaków (obecnie Plac na Bramie), strzałka oznacza kamienicę Rosiewicza [4]

Fig. 1. Historical postcard with the view of the former Fiacre Square (now the Square at the Gate), the arrow indicates the Rosiewicz tenement house [4]

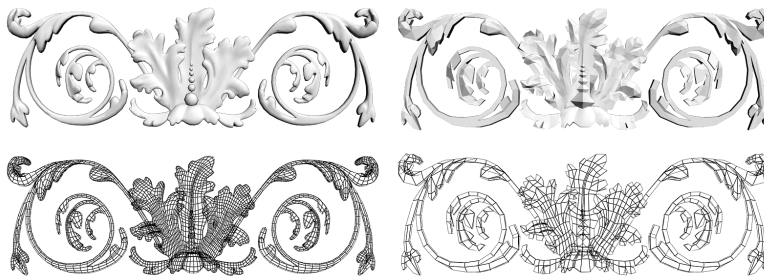


Rys. 2. Widok zbombardowanej 8 września 1939 r. przez lotnictwo niemieckie kamienicy Rosiewicza [5]

Fig. 2. View of the Rosiewicz tenement house bombed on September 8 by the German air force [5]

Szczególnie duże nasycenie elementów wystroju elewacji oraz balustrad balkonów było powodem, iż zdecydowano się na komputerowe odwzorowanie geometrii tej kamienicy. Wykonane zostały żmudne poszukiwania dostępnej

dokumentacji fotograficznej obiektu oraz analiza cech geometrycznych poszczególnych stref fasady. Ostatecznie całkowita złożoność geometryczna modelu zamknęła się liczbą ponad 1 500 000 poligonów oraz podobną liczbą wierzchołków. Miarą możliwości skutecznego modelowania komputerowego tego typu obiektów jest przykład wykonanego pojedynczego ornamentu, który przekształcano korzystając z dostępnych funkcji aplikacji graficznej (rys. 3) [10,11].



Rys. 3. Element wystroju elewacji z zagęszczoną siatką po lewej, oraz ten sam obiekt z wyłączoną opcją zagęszczenia po prawej. Na górze widok cieniowany, na dole widok krawędziowy [6]

Fig. 3. Element of the façade interior with the dense grid on the left, and the same object with the disabled option of density on the right. The shaded view on the top, the edge view on the bottom [6]



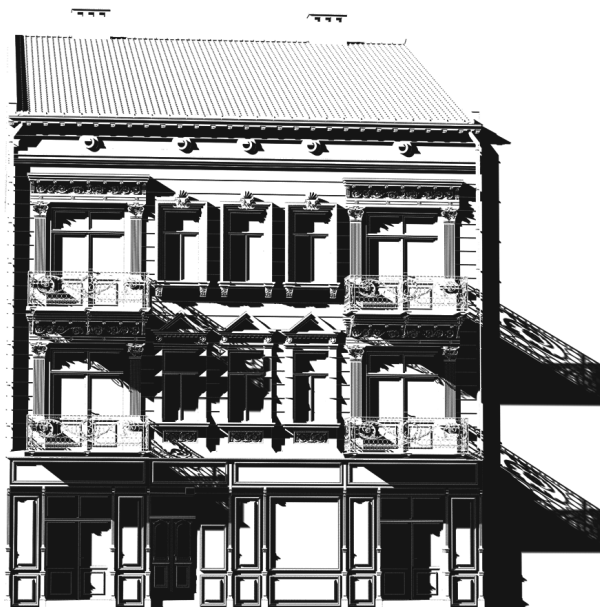
Rys. 4. Wizualizacja kompletnego modelu komputerowego kamienicy Rosiewicz [6]

Fig. 4. Visualisation of the complete computer model of the Rosiewicz tenement house [6]

O ile odwzorowanie geometrii kamienicy było możliwe na podstawie dobrej jakości pocztówek z okresu międzywojennego, o tyle brak było precyzyjnych informacji o kolorystyce elewacji. Dlatego też, przeanalizowano podobną zabudowę w śródmieściu Przemyśla. Na tej podstawie zdefiniowano kolorystykę poszczególnych materiałów pokrywających elewację obiektu.

Dla uzyskania realistycznych efektów oddziaływania czasu na materiały elewacji (zacieki, zabrudzenia dolnej partii ściany itp.) wykorzystano procedury modelowania tekstur dostępne w aplikacji graficznej [12, 13]. Finalnie uzyskano wizualizację komputerową obrazującą obiekt rzeczywisty (rys. 4).

Zasadniczo taka postać wizualizacji jest wystarczająca i może służyć do analiz rewitalizacyjnych, jednak znacznie atrakcyjniejsze jest wkomponowanie wizualizacji komputerowej we współczesne zdjęcie otoczenia. W tym przypadku założono jeden z możliwych sposobów oddziaływania oświetlenia naturalnego – oświetlenie bezchmurne. Dla pory dnia, odpowiadającej kierunkowości padania cieni na zdjęciu współczesnym, przygotowano w środowisku komputerowym analogiczny model rozkładu cieni modułu oświetleniowego [14]. Dzięki temu możliwe było późniejsze połączenie ze sobą obrazu rzeczywistego otoczenia kamienicy ze stworzonym komputerowo obrazem obiektu (rys. 5). Oczywiście drugim warunkiem było takie ustawienie umownego obserwatora obiektu w środowisku aplikacji graficznej, aby odpowiadało ono miejscu obserwacji w środowisku rzeczywistym.



Rys. 5. Render cieni powstałych na elementach elewacji na etapie modelowania oświetlenia [6]

Fig. 5. Render of shadows created on the façade elements on the light modelling stage [6]



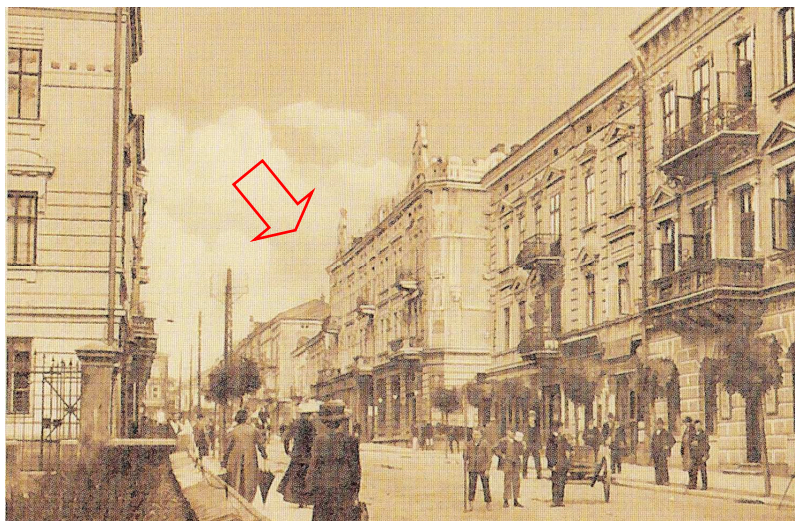
Rys. 6. Widok na współczesny ciąg zabudowy z naniesionym modelem komputerowym kamienicy [6]

Fig. 6. View of the string of buildings with the fitted computer model of the building [6]

Rezultat połączenia tych dwu obrazów ilustruje rys. 6. Istotnie udało się uzyskać na istniejącym współcześnie fragmencie elewacji (kamienica najbardziej wysunięta na prawo) cienie balkonów kamienicy współcześnie nieistniejącej. W odczuciu autorów powstała kompozycja może stanowić dobry materiał wyjściowy do prób odtworzenia kamienicy z nowoczesną funkcją jej wnętrza.

3. Komputerowe odwzorowanie Pasażu Gansa w Przemyślu

Pasażem Gansa nazywano przed II wojną światową okazały gmach stojący niegdyś na Placu Legionów w Przemyślu. Obecnie w bardzo ubogiej literaturze na jego temat zwykle spotyka się określenie Hotel Royal, które pochodzi od nazwy luksusowego hotelu mieszczącego się na 1 i 2 piętrze tego budynku, pasażem Gansa, zaś rejon jego umiejscowienia. Gmach Pasażu został wybudowany przed rokiem 1895 przez jedną z firm lwowskich. Jego właścicielem od początku był Israel Gans. Mieściły się tam oprócz hotelu księgarnia M.G. Rosenfelda, restauracja i piwiarnia, mleczarnia i herbaciano-kawiarnia [15] (rys. 7). Został poważnie uszkodzony podczas niemieckiego bombardowania 8 września 1939 roku. Podobnie jak kamienica Rosiewiczza został po wojnie całkowicie rozebrany. Na jego miejscu zorganizowano parking samochodowy (rys. 8).



Rys. 7. Widok Pasażu Gansa na historycznej widokówce z pocz. XX w. [7]

Fig. 7. View of the Gans Passage on the historical postcard from the beginning of the XX c. [7]



Rys. 8. Współczesny widok miejsca lokalizacji Pasażu Gansa [8]

Fig. 8. Contemporary view of the location of the Gans Passage [8]

W odróżnieniu do wcześniejszego obiektu Pasaż Gansa obejmował nie jedną ale trzy elewacje. W efekcie cały model geometryczny zawierał około 3 150 000 poligonów oraz około 2 900 000 wierzchołków (rys. 9). Zgodność wymiarów

modelu krawędziowego Pasażu z obiektem rzeczywistym ustalono analizując dostępne zdjęcia i widokówki obiektu i uwzględniając perspektywiczne zniekształcenia wymiarowe. Weryfikacja przyjętych wymiarów modelu została przeprowadzona w oparciu o dokumentację satelitarną miejsca lokalizacji obiektu oraz pomiary porównawcze charakterystycznych elementów architektonicznych obiektów współcześnie istniejących i sąsiadujących z obiektem.



Rys. 9. Model krawędziowy Pasażu Gansa [6]

Fig. 9. Edge model of the Gans Passage [6]

Budynek został zaprojektowany w stylu secesyjnym. Z tego właśnie względu elewacje pokryte były dużą liczbą dekoracyjnych motywów roślinnych np. płyciny umiejscowione pod parapetami, gdzie umieszczono motyw kwiatów słonecznika. Bez wątplenia tak duży stopień komplikacji geometrycznej zdobień elewacji był pewnego rodzaju próbą możliwości oprogramowania graficznego. Jak widać na rysunku nr 9 zadanie zostało wykonane. Można jedynie dodać, iż niektóre elementy dekoracyjne elewacji zostały odwzorowane w środowisku graficznym z dokładnością mniejszą niż 5 cm.

Sporym wyzwaniem okazało się przygotowanie charakterystyki kolorystycznej elewacji Pasażu Gansa. Niestety dostępna dokumentacja fotograficzna obiektu jest praktycznie czarno-biała. Pomocna w przyporządkowaniu dużej liczbie zdobień elewacji właściwej kolorystyki okazała się analiza obiektów stylu secesyjnego istniejących współcześnie. Finalnie powstał pełny model Pasażu Gansa, Jego wizualizację przedstawiono na rys. 10.



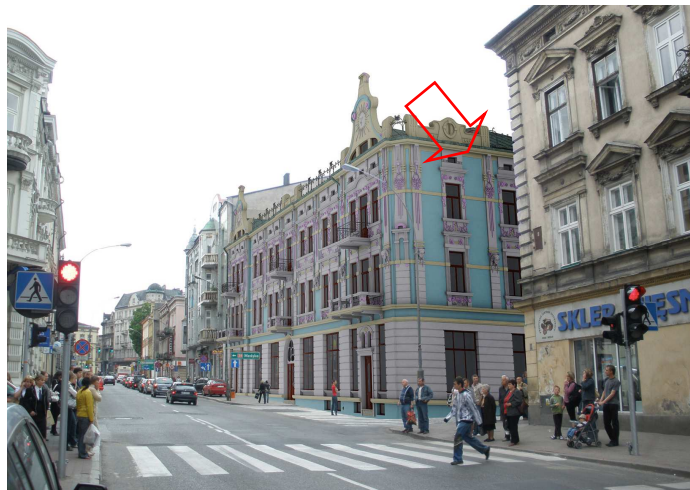
a)



b)

Rys. 10. Widok kompletnego modelu Pasażu Gansa, a – fragment elewacji z roślinną ornamentyką, b – pełny widok dwu elewacji obiektu [6]

Fig. 10. View of the complete model of the Gans Passage, a - detail of the facade with the plant ornamentation, b - full view of two building facades [6]



Rys. 11. Wizualizacja połączenia współczesnego otoczenia z modelem Pasażu Gansa [6]

Fig. 11. Visualisation of the combination of the modern surroundings with the model of the Gans Passage [6]

Ostatnim elementem prezentacji możliwości wizualizacyjnych aplikacji graficznych było naniesienie na współczesne zdjęcie komputerowej wizualizacji Pasażu Gansa. W tym przypadku wybrano drugą metodę oświetlenia modelu – metodę światła rozproszonego, właściwego dla oświetlenia naturalnego w warunkach zachmurzenia. Wówczas przy wielokierunkowym oświetleniu nie obserwuje się cieni [16, 17]. Rysunek 11 przedstawia ostateczny rezultat prac. Bez wątpliwa prezentowane ujęcie jest bardziej korzystne niż współczesny widok tego miejsca.

4. Podsumowanie

Przedstawione dwa przykłady próby komputerowego odtworzenia historycznej zabudowy Przemysła dają obraz wizualizacyjnych możliwości aplikacji graficznych. Zarówno na poziomie aplikacyjnym jako i obliczeniowym istnieją duże możliwości odwzorowywania skomplikowanych form zabudowy historycznej.

Wkomponowana w istniejącą zabudowę wizualizacja Kamienicy Rosiewiczza wskazuje na słusność podejmowania starań rewitalizacji tego i podobnych miejsc w Przemysle. Poza uporządkowaniem linii zabudowy została wprowadzona harmonia stylu tej tak zwanej „plomby” budowlanej. Bez trudu można wskazać przykłady nieudanych realizacji podobnych „plomb”.

Gmach Hotelu Royal jest przykładem pięknej secesji roślinnej, którą z rozmachem stosowano jeśli chodzi o dekoracje i ostrożnie jeśli chodzi o bryłę obiektu. Asymetrię stosowano z umiarem stosując ją raczej do wykończenia

elewacji niż do planu budynku. Zarówno w Polsce jak i na świecie budynki wybudowane w tym stylu należą do rzadkości. Jest to spowodowane krótką historią stylu Art. Nouveau, liczącą zaledwie nieco ponad 20 lat. Dlatego też obiekt ten jest tym bardziej cenny.

W propozycjach rewitalizacyjnych można ująć odtworzenie elewacji Pasażu Gansa i nadanie temu obiektowi nowej funkcji. Zaznaczając, iż jest on zlokalizowanych blisko głównego dworca kolejowego można rozważyć stworzenia wewnątrz galerii wielkopowierzchniowej lub nawet wielopoziomowego parkingu samochodowego.

Literatura

- [1] <http://wojnawp.republika.pl/zniszc/z.html> {dostęp 12.06.2016 r.}.
- [2] Stępień S.: Studia Przemyskie tom 2, Przemysł 2004.
- [3] Murdock Kelly L.: 3ds Max 8 Biblia, Helion, Gliwice 2007.
- [4] <http://www.swistak.pl/a58476502,A-02-PRZEMYSL-PLAC-NABRAMIE.html#zdjecia> {dostęp 12.06.2016 r.}.
- [5] <http://przemysl.fotopolska.eu/niestniejace,248,20/woj.podkarpackie.html> {dostęp 12.06.2016 r.}.
- [6] Wizualizacje komputerowe powstałe w ramach działalności Koła Naukowego Elektroenergetyk.
- [7] http://viewcardsworld.blogspot.com/2012_04_01_archive.html {dostęp 12.06.2016 r.}.
- [8] Dokumentacja fotograficzna autorów.
- [9] Cole E.: Architektura Style i detale, Arkady, Warszawa 2008.
- [10] Ross A., Bousquet M.: 3ds max 5 Projekty i rozwiązania, Helion, Gliwice 2004.
- [11] Murdock K.L.: 3ds max 4 Techniki modelowania, Helion, Gliwice 2002.
- [12] Bell J.A.: 3D Studio MAX 3 efekty specjalne, Helion, Gliwice 2000.
- [13] Adobe: Adobe Photoshop CS2 Podręcznik użytkownika, Adobe Systems Incorporated, 2005.
- [14] Birn J.: Cyfrowe oświetlenie i rendering, Helion, Gliwice 2007.
- [15] Wójcik A.: Spacerkiem po Przemysłu w roku 1900, Rzeszowskie Zakłady Graficzne S.A. Przemysł 2003.
- [16] Busch D.D.: Fotografia cyfrowa i obróbka obrazu, Helion, Gliwice 2002.
- [17] Bucher Ch.: Oświetlenie Warsztaty fotograficzne, Helion, Gliwice 2009.

Praca została wykonana w ramach działalności Koła Naukowego Elektroenergetyk, z wykorzystaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu: "Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej", współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Projektu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Oś priorytetowa 1 – Konkurencyjna i innowacyjna gospodarka.

POSSIBILITIES OF USING THE ADVANCED GRAPHIC APPLICATIONS IN THE REVITALISATION WORKS

Summary

In the classic sense, revitalisation includes a number of actions aimed to transform the isolated area for the benefit, which for various reasons has been degraded. The directions of these transformations can be different, however, they largely concern the historical areas, damaged during World War II. Today, at the planning stage of the revitalisation works of the historic buildings, we use a series of engineering graphic applications, which allow to visualise the considered revitalisation concepts. The dynamic progress in the development of the tool software and computing capabilities creates a new quality in the capabilities to visualise the architectural objects. The aim of the undertaken and presented works in the article was to show the possibilities for using the modern, advanced graphic applications in the revitalisation works of the historic buildings of Przemyśl. For the detailed works two buildings have been initially selected, which have once existed in the downtown: tenement house no. 4, located by the Square on the Gate and the Gans Passage located at Mickiewicz Street. On the basis of the existing photographic documentation – usually postcards, the spatial form of these elevations was restored, with the rich architectural interior. Using the extensive possibilities for modelling the features of the surfaces covering the facades and the roofing, the condition of the materials of the exterior walls and the roofs of the considered objects was closely mapped. Finally, at the stage of modelling the daylight, two cases of natural lighting were considered: directional light, occurring in the cloudless time, and distributed, occurring during a uniform cloud cover. Visualisation created in the workflow have been applied to the contemporary photos of the locations of these buildings. The obtained visual effect allows to make the assessment of the relevance of the aim to restore the historical buildings surrounded by the modern buildings and to plan their contemporary function.

Keywords: historical buildings, computer mapping of architectural buildings, visualisation tools, daylight modelling

Przesłano do redakcji: 19.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Agnieszka WIATER¹
Tomasz SIWOWSKI²

NOŚNOŚĆ NA ŚCINANIE ZGINANYCH ELEMENTÓW BETONOWYCH ZBROJONYCH PRĘTAMI KOMPOZYTOWYMI FRP W ŚWIETLE WYBRANYCH PROCEDUR OBLICZENIOWYCH

Pręty kompozytowe FRP (ang. *fibre reinforced polymer*) ze względu na wysoką wytrzymałość i odporność na korozję są obiecującą alternatywą dla tradycyjnego zbrojenia betonu i mają coraz szersze zastosowanie. W projektowaniu elementów betonowych zbrojonych prętami FRP na szczególną uwagę zasługują zagadnienie nośności na ścinanie. Ścinanie jest zjawiskiem złożonym w konstrukcjach żelbetowych, a w przypadku zbrojenia kompozytowego opis mechanizmów jest jeszcze trudniejszy ze względu na liniowo sprężystą charakterystykę i anizotropowe właściwości prętów FRP. W pracy przeprowadzono przegląd procedur obliczeniowych dotyczących określania nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi, bez zbrojenia poprzecznego. Wyodrębniono trzy grupy procedur: (I) będące modyfikacją wzorów stosowanych w przypadku konstrukcji żelbetowych, (II) będące modyfikacją istniejących procedur projektowych dla elementów zbrojonych prętami FRP oraz (III) wzorów opracowanych w oparciu o analizę wyników badań doświadczalnych i zastosowania różnych narzędzi obliczeniowych. Przedstawiono analizę sposobu uwzględniania w dostępnych procedurach obliczeniowych wpływu parametrów zmiennych przekroju elementu, m.in. geometria elementu, smukłość ścinania, stopień zbrojenia podłużnego, moduł Younga kompozytu FRP oraz wytrzymałość betonu na ściskanie. Porównano wartości wyznaczone wybranymi procedurami i podjęto próbę określenia przyczyn wykazanych rozbieżności. Przeanalizowano również procedury uwzględniające zastosowanie betonu lekkiego i porównano wyznaczone według nich wartości z wynikami własnych badań doświadczalnych. Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano konieczność prowadzenia dalszych badań nad nośnością na ścinanie elementów z betonu lekkiego zbrojonego prętami kompozytowymi.

Słowa kluczowe: zbrojenie niemetaliczne, kompozyt FRP, nośność na ścinanie, procedura obliczeniowa, beton lekki

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Agnieszka Wiater, Politechnika Rzeszowska, Zakład Dróg i Mostów, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651017; wiater@prz.edu.pl

² Tomasz Siwowski, Politechnika Rzeszowska, Zakład Dróg i Mostów, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651019; siwowski@prz.edu.pl

1. Wprowadzenie

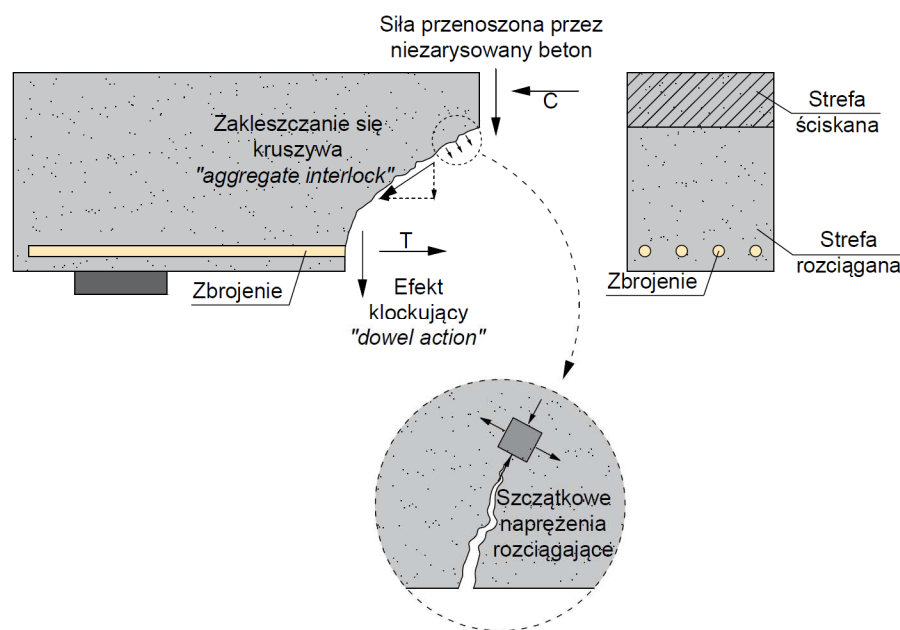
Pręty kompozytowe FRP (ang. *fibre reinforced polymer*) ze względu swoje doskonałe własności mechaniczne i fizyczne stały się ostatnio obiecującą alternatywą dla tradycyjnego zbrojenia stalowego konstrukcji betonowych. W zależności od użytych włókien produkuje się obecnie pręty z kompozytów szklanych (GFRP), węglowych (CFRP), aramidowych (AFRP) oraz bazaltowych (BFRP). Osnowę włókien stanowią najczęściej żywica poliestrowa, winyloestrowa lub epoksydowa. Ze względu na różnicę w składzie kompozytów pręty FRP różnią się między sobą własnościami mechanicznymi i fizycznymi [41]. Najszersze zastosowanie w budownictwie mają pręty z kompozytów szklanych GFRP, głównie ze względu na najlepszy stosunek wytrzymałości do ceny. W porównaniu z prętami stalowymi można wymienić wiele zalet prętów kompozytowych, takich jak wysoka wytrzymałość, duża odporność na korozję, odporność chemiczna, neutralność elektromagnetyczna oraz mała masa. Wymienione cechy prętów kompozytowych zapewniają wysoką trwałość betonowych elementów konstrukcyjnych zbrojonych tymi prętami oraz redukcję kosztów utrzymania obiektów w cyklu życia, co jest coraz częściej główną przyczyną ich stosowania np. w obiektach mostowych [16]. Zbrojenie kompozytowe GFRP jest już od kilkunastu lat szeroko stosowane jako zbrojenie płyt pomostów obiektów mostowych w Kanadzie, USA czy Japonii. Zastosowanie prętów kompozytowych w obiektach mostowych opisano szeroko między innymi w pracy [33].

Praca pod obciążeniem betonowych elementów zginanych, zbrojonych prętami kompozytowymi, różni się od pracy elementów żelbetowych i wynika z własności zbrojenia kompozytowego, które nie uplastycznia się i pracuje liniowo sprężyste aż do zniszczenia. Podobnie jak w przypadku żelbetu podstawą do wyznaczenia nośności na zginanie elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi jest rozkład naprężeń w przekroju w fazie poprzedzającej zniszczenie. W projektowaniu elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi stosuje się takie same założenia, jak w przypadku zbrojenia stalowego, tj.:

- przekroje płaskie przed odkształceniem pozostają płaskie po odkształceniu,
- zapewniona jest pełna współpraca pomiędzy betonem a prętem zbrojeniowym,
- naprężenia w materiałach (beton, pręt FRP) przyjmuje się na podstawie odkształceń w przekroju i odpowiednich praw materiałowych,
- wytrzymałość betonu na rozciąganie jest pomijalna.

W przypadku żelbetu zniszczenie elementu jest kontrolowane przez zmiążdżenie betonu poprzedzające lub następujące po uplastycznieniu stali, natomiast w elementach zbrojonych kompozytem FRP zniszczenie może nastąpić w wyniku zmiążdżenia betonu i/lub przerwania prętów kompozytowych. W rezultacie materiał (beton lub zbrojenie FRP) który pierwszy osiągnie graniczne odkształcenie, determinuje postać zniszczenia elementu. Obie postaci zniszczenia mają charakter nagły i niesygnalizowany, jednak ze względów bezpieczeństwa zale-

cany mechanizmem stanowiącym podstawę analizy nośności przekroju jest wyczerpanie wytrzymałości betonu na ściskanie. Elementy zbrojone prętami FRP wykazują większe ugięcia i rozwarości rys niż w przypadku żelbetu. Jednakże jeżeli podstawą wyznaczania nośności na zginanie jest model zniszczenia poprzez zmiżdżenie betonu, kryteria stanu granicznego użyteczności są zazwyczaj spełnione. W przypadku nośności na ścinanie w wyniku zastosowania zbrojenia FRP, które może charakteryzować się 3-krotnie niższym modułem sprężystości niż stal zbrojeniowa, przekrój zarysowany ma mniejszą wysokość strefy ściskanej w odniesieniu do elementów ze zbrojeniem stalowym. Zmniejszenie wysokości strefy ściskanej przekroju skutkuje zwiększeniem rozwarości rys, w rezultacie czego nośność elementu zapewniona przez zakleszczanie się kruszywa i strefę ściskaną przekroju jest mniejsza niż w przypadku konstrukcji żelbetowych. Pomimo kilkunastu lat stosowania prętów FRP w obiektach budowlanych, nadal jest poszukiwany racjonalny model opisujący mechanizmy zniszczenia przez ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi, który posłużyłby do szacowania ich nośności na ścinanie [34].



Rys. 1. Mechanizmy zapewniające nośność elementów żelbetowych na ścinanie

Fig. 1. Shear mechanism of reinforced concrete members

Zagadnienie ścinania w konstrukcjach żelbetowych jest zjawiskiem złożonym, związanym z jednoczesnym występowaniem kilku mechanizmów wewnętrznych. Można wymienić pięć podstawowych mechanizmów mających wpływ na przeniesienie siły ścinającej przez zbrojony przekrój betonowy

(Rys. 1). Są to: (a) przenoszenie siły przez strefę ściskaną betonu niezarysowanego, (b) przenoszenie siły przez tarcie wzdłuż rysy spowodowane zakleszczeniem się kruszywa (ang. *aggregate interlock*), (c) przenoszenie siły dzięki szczątkowej wytrzymałości na rozciąganie betonu w poprzek rysy, (d) przenoszenie siły przez poprzeczną pracę zbrojenia podłużnego, tzw. efekt klockujący (ang. *dowel action*), (e) przenoszenie siły przez zbrojenie poprzeczne (jeśli występuje) [10], [26]. Te same mechanizmy występują w konstrukcjach betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi, jednak ich zakres i tym samym wpływ na nośność elementu są inne.

Piśmiennictwo dotyczące zjawiska ścinania w konstrukcjach żelbetowych jest bardzo obszerne. Pomimo tego złożoność opisanego mechanizmu stanowi główny problem w prognozowaniu nośności na ścinanie elementów betonowych oraz jest powodem ciągłych poszukiwań lepszego opisu tego zjawiska. Dostępne procedury normowe dotyczące konstrukcji żelbetowych niekiedy budzą wątpliwości i nie opisują wystarczająco dokładnie występujących mechanizmów, a tym samym dość często wykazują zbyt duży konserwatyzm [26]. Ponadto procedury te nie mogą być bezpośrednio zastosowane do projektowania elementów betonowych ze zbrojeniem kompozytowym, co jest spowodowane innymi własnościami mechanicznymi prętów FRP w porównaniu ze zbrojeniem stalowym. Dlatego też konstrukcje betonowe zbrojone prętami kompozytowymi wymagają opracowania indywidualnych procedur obliczeniowych [49].

Szeroką analizę wpływu różnych parametrów na mechanizm zniszczenia oraz nośność na ścinanie belek zbrojonych prętami kompozytowymi przedstawiono w pracy [27]. Na podstawie wyników badań 203 belek zbrojonych prętami szklanymi, węglowymi, aramidowymi oraz stalowymi, przeanalizowano wpływ smukłości ścinania, rodzaju i stopnia zbrojenia podłużnego, wytrzymałości betonu na ściskanie oraz wymiarów elementu na nośność belek na ścinanie. Autorzy wykazali podstawowe różnice w nośności na ścinanie elementów betonowych, zbrojonych prętami kompozytowymi i stalowymi. W odróżnieniu od konstrukcji żelbetowych, mechanizm zniszczenia na ścinanie elementów betonowych ze zbrojeniem kompozytowym ma łagodniejszy charakter i następuje w sposób mniej nagły. Na podstawie analizy piśmiennictwa stwierdzono brak badań nad wpływem na nośność na ścinanie takich parametrów jak: pole przekroju zbrojenia kompozytowego, przyczepność zbrojenia do betonu oraz liczba prętów i liczba poziomów zbrojenia. Wskazano potrzebę prowadzenia dalszych badań i analiz ze względu na istotne różnice w nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi i stalowymi [27].

W niniejszej pracy podjęto próbę analizy dostępnych procedur obliczeniowych, mających na celu określenie nośności na ścinanie elementów betonowych ze zbrojeniem kompozytowym bez zbrojenia poprzecznego. Ponieważ, jak wykazały badania przedstawione w pracach [19] i [40], szerokość elementu ma nieznaczny wpływ na jego nośność na ścinanie, opisane procedury mogą mieć zastosowanie zarówno do belek jak i płyt betonowych.

Analizowane procedury obliczeniowe podzielono na trzy zasadnicze grupy:

- (I) procedury będące modyfikacją metod stosowanych w konstrukcjach żelbetonowych (z prętami stalowymi);
- (II) procedury będące modyfikacją metod stosowanych w elementach zbrojonych prętami kompozytowymi;
- (III) procedury opracowane na podstawie wyników badań eksperymentalnych oraz z wykorzystaniem specjalistycznych analiz, wspomaganych różnymi narzędziami obliczeniowymi (m. in. programowanie genetyczne, sieci neuronowe, itp.).

Na podstawie przeglądu procedur zestawionych w tych trzech grupach ustalono wpływ głównych parametrów przekroju poprzecznego elementu na jego nośność na ścinanie oraz zidentyfikowano obszary wymagające dalszych badań i analiz.

W procedurach obliczeniowych opisanych w dalszej części pracy przyjęto następujące oznaczenia (ujednolicone):

- a - odległość punktu przyłożenia obciążenia od punktu podparcia;
- a_g - maksymalny wymiar kruszywa w mieszance betonowej,
- a/d - smukłość ścinania, tj. stosunek odległości punktu przyłożenia obciążenia od punktu podparcia do wysokości użytecznej przekroju;
- A_f - pole przekroju zbrojenia kompozytowego;
- b_w - szerokość przekroju lub szerokość średnika belki teowej;
- d - wysokość użyteczna przekroju, tj. odległość środka ciężkości zbrojenia rozciąganego od najbardziej ściskanej krawędzi betonu;
- E_c - moduł sprężystości betonu;
- E_f - moduł sprężystości zbrojenia kompozytowego;
- E_s - moduł sprężystości zbrojenia stalowego;
- f_c - wytrzymałość betonu na ściskanie;
- f_{ct} - wytrzymałość betonu na rozciąganie;
- h - wysokość przekroju;
- M - moment zginający w analizowanym przekroju;
- V - siła poprzeczna w analizowanym przekroju;
- V_c - nośność na ścinanie elementów bez zbrojenia poprzecznego;
- ε_y - graniczne odkształcenie stali zbrojeniowej;
- λ - współczynnik redukcyjny dla betonów lekkich;
- ρ_f - stopień podłużnego zbrojenia kompozytowego elementu, tj. stosunek pola przekroju zbrojenia podłużnego do szerokości i wysokości użytecznej przekroju;
- ρ_s - stopień podłużnego zbrojenia stalowego elementu, definiowany identycznie jak w przypadku zbrojenia FRP.

Przytoczone wzory pozwalają określić charakterystyczną nośność na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi bez zbrojenia poprzecznego, pomijając współczynniki bezpieczeństwa przyjmowane w poszczególnych normach.

2. Przegląd procedur obliczeniowych

2.1. Procedury będące modyfikacją metod stosowanych w konstrukcjach żelbetowych

Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP powstałe na podstawie modyfikacji wzorów dotyczących konstrukcji żelbetowych zestawiono w tabeli 1 w kolejności chronologicznej. Przede wszystkim należy podkreślić, że już same wzory podstawowe – dotyczące obliczania nośności na ścinanie elementów żelbetowych, różnią się znacząco. W tym kontekście różnorodność zastosowanych modyfikacji tych wzorów dla elementów zbrojonych prętami kompozytowymi różnice te tylko powiększyło. Warto jednak przeanalizować chociażby główne kierunki tych modyfikacji, aby zidentyfikować parametry przekroju zbrojonego, które w największym stopniu takiej modyfikacji podlegały.

Zestawione w tabeli 1 wzory na obliczenie nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi powstały w wyniku modyfikacji wzorów na nośność na ścinanie elementów żelbetowych przez:

- zastąpienie stopnia zbrojenia stałą ρ_s przez znormalizowany stopień zbrojenia kompozytem $\rho_f (E_f/E_s)$ - poz. 1, 2, 4, 7 (pośrednio uwzględniając typową wartość modułu Younga zbrojenia stalowego E_s), poz. 10, 13, 20, tabela 1;
- zmianę wartości nośności na ścinanie V_c przez wprowadzenie współczynnika $a(E_f/E_s)^n$ z odpowiednio dobraną wartością mnożnika a i wykładnika potęgi n - poz. 3 ($a = 1; n = 1$), poz. 5 ($a = 3; n = 1$), poz. 6 ($a = 1; n = 0,5$), poz. 12 ($a = 1,3; n = 0,5$), poz. 17 ($a = 1,65; n = 0,6$), poz. 19 ($a = 1; n = 1/3$), tabela 1;
- zmianę wartości nośności na ścinanie V_c za pomocą stosunku sztywności zbrojenia kompozytowego do sztywności zbrojenia stalowego ($\rho_f E_f / \rho_s E_s$) - poz. 8, 9, tabela 1;
- zmianę wartości nośności na ścinanie V_c przez wprowadzenie współczynnika redukcyjnego w postaci $\left(\frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{4,5\text{‰}}{\varepsilon_y}\right)^{1/3}$, uwzględniającego stosunek modułów kompozytu i stali zbrojeniowej (E_f/E_s) oraz dopuszczalne odkształcenie zbrojenia kompozytowego, przyjęte na poziomie 4,5‰, w stosunku do odkształcenia uplastyczniającego stali zbrojeniowej (ε_y) – poz. 11, tabela 1;
- adaptację metody MCFT (ang. *modified compression field theory*), stosując współczynnik $\sqrt{\frac{E_f}{E_s}}$ - poz. 14, tabela 1; lub uwzględniającą większy zakres odkształceń granicznych prętów FRP niż w przypadku zbrojenia stalowego - poz. 15, tabela 1;
- zmianę wartości nośności na ścinanie V_c za pomocą współczynnika, uwzględniającego w inny sposób (niż wymienione wyżej metody) dane parametry: stosunek modułów sprężystości kompozytu i stali (E_f/E_s), smukłość ścinania (a/d) oraz stopień zbrojenia elementu (ρ_f) - poz. 16, tabela 1; smukłość ścina-

nia (a/d) oraz moduł sprężystości zbrojenia kompozytowego E_f - poz. 18, tabela 1.

Na podstawie analizy procedur obliczeniowych zestawionych w tabeli 1 można stwierdzić, że głównym kierunkiem modyfikacji wzorów dla konstrukcji żelbetowych było zastosowanie stosunku modułów sprężystości kompozytu i stali (E_f/E_s) do redukcji stopnia zbrojenia elementu ρ_s lub bezpośrednio redukcji nośności na ścinanie V_c . W niektórych wzorach uwzględniano także różnicę w odkształcalności obu materiałów - za pomocą ilorazu dopuszczalnych odkształceń w zbrojeniu kompozytowym i odkształceń uplastyczniających stal zbrojeniową.

Tabela 1. Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP będące modyfikacją metod stosowanych w konstrukcjach żelbetowych

Table 1. The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which are modification of design equations for the steel reinforced construction

Lp.	Procedura	Wzór
1.	Tottori i in. (1993) [43]	$V_c = 0,2 \left(100 \rho_f f_c \frac{E_f}{E_s} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d}{1000} \right)^{\frac{1}{4}} \left[0,75 + \frac{1,4}{\left(\frac{a}{d} \right)} \right] b_w d$
2.	JSCE-97 (1997) [24]	$V_c = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d$ <p>gdzie:</p> $\beta_d = \sqrt[4]{1/d[m]} \leq 1,5$ $\beta_p = \sqrt[3]{100 \rho_f E_f / E_s} \leq 1,5$ $\beta_n = 1,0, \text{ w przypadku braku siły osiowej}$ $f_{vcd} = 0,2 \sqrt[3]{f_c} \leq 0,72 N / mm^2$
3.	Michaluk i in. (1998) [32]	$V_c = \frac{E_f}{E_s} \left(\frac{1}{6} \sqrt{f_c} b_w d \right)$
4.	IStructE (1999) [21]	$V_c = 0,79 \left(100 \rho_f \frac{E_f}{E_s} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{400}{d} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{f_{cu}}{25} \right)^{\frac{1}{3}} b_w d$ <p>gdzie:</p> $f_{cu} = 1,25 f_c$

Tabela 1 (cd.). Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP będące modyfikacją metod stosowanych w konstrukcjach żelbetowych

Table 1 (cont.). The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which are modification of design equations for the steel reinforced construction

Lp.	Procedura	Wzór
5.	Deitz i in. (2001) [12]	$V_c = 3 \frac{E_f}{E_s} \left(\frac{1}{6} \sqrt{f_c} b_w d \right)$
6.	ISIS (2001,2007) [22]	<p>Dla $d < 300mm$:</p> $V_c = 0,2 \lambda \sqrt{f_c} b_w d \sqrt{\frac{E_f}{E_s}}$ <p>Dla $d > 300mm$:</p> $V_c = \left(\frac{260}{1000 - d} \right) \lambda \sqrt{f_c} b_w d \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} \geq 0,1 \lambda \sqrt{f_c} b_w d \sqrt{\frac{E_f}{E_s}}$
7.	CSA-S806-02 [7]	<p>Dla $d < 300mm$:</p> $V_c = 0,035 \lambda \left(f_c \rho_f E_f \frac{V}{M} d \right)^{\frac{1}{3}} b_w d$ <p>Przy czym:</p> $\frac{V}{M} d \leq 1,0$ <p>oraz spełniony jest warunek:</p> $0,1 \lambda \sqrt{f_c} b_w d \leq V_c \leq 0,2 \lambda \sqrt{f_c} b_w d$ <p>Dla $d > 300mm$:</p> $V_c = \left(\frac{130}{1000 + d} \right) \lambda \sqrt{f_c} b_w d \geq 0,08 \lambda \sqrt{f_c} b_w d$
8.	ACI 440.1R-03 [2]	$V_c = \frac{\rho_f E_f}{90 \beta_1 f_c} \left(\frac{\sqrt{f_c} b_w d}{6} \right)$ <p>gdzie:</p> $\beta_1 = \begin{cases} 0,85 & \text{dla } f_c \leq 28[MPa] \\ 0,85 - 0,05 \frac{f_c - 28[MPa]}{7[MPa]} & \text{dla } f_c = 28 \div 56[MPa] \\ 0,65 & \text{dla } f_c \geq 56[MPa] \end{cases}$

Tabela 1 (cd.). Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP będące modyfikacją metod stosowanych w konstrukcjach żelbetowych

Table 1 (cont.). The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which are modification of design equations for the steel reinforced construction

Lp.	Procedura	Wzór
9.	ECP 208 (2005) [13]	$V_c = 0,24 \sqrt{f_c} \left(\frac{\rho_f \cdot E_f}{\rho_s \cdot E_s} \right) b_w d$ <p>gdzie: $\rho_s = 5 \cdot 10^{-4} f_c$</p>
10.	Wegian i in. (2005) [46]	$V_c = 2 \left(f_c \frac{\rho_f E_f d}{E_s a} \right)^{\frac{1}{3}} b_w d$
11.	Guadagnini i in. (2006) [18]	<p>Eurokod 2:</p> $V_c = 0,18 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \left(100 \frac{A_f E_f 4,5\%}{b_w d E_s \varepsilon_y} f_c \right)^{1/3} b_w d$ <p>BS 8110:</p> $V_c = 0,79 \left(100 \rho_f \frac{E_f 4,5\%}{200 \varepsilon_y} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{400}{d} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{f_{cu}}{25} \right)^{\frac{1}{3}} b_w d$ <p>gdzie: $f_{cu} = 1,25 f_c$</p> <p>ACI 318-05:</p> $V_c = \left(\frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{4,5\%}{\varepsilon_y} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w d$

Tabela 1 (cd.). Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP będące modyfikacją metod stosowanych w konstrukcjach żelbetowych

Table 1 (cont.). The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which are modification of design equations for the steel reinforced construction

Lp.	Procedura	Wzór
12.	CNR DT 203 – 2006 [11]	$V_c = \min(V_{Rd,ct}; V_{Rd,max})$ $V_{Rd,ct} = 1,3 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{\frac{1}{2}} \tau_{Rd} k_d (1,2 + 40\rho_f) b_w d$ $V_{Rd,max} = 0,5 \cdot v_1 \cdot f_c \cdot b_w \cdot 0,9d$ <p>gdzie:</p> $\tau_{Rd} = 0,25 f_{ct}$ $k_d = 1,6 - d[m] \geq 1$ $v_1 = \begin{cases} 0,6 & \text{dla } f_c \leq 60[MPa] \\ 0,9 - \frac{f_c}{200} \geq 0,5 & \text{dla } f_c > 60[MPa] \end{cases}$ <p>Przy czym:</p> $1,3 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 1$
13.	Nehdi i in. (2007) [36]	$V_c = 2,1 \left(\frac{f_c' \cdot \rho_f \cdot d}{a} \cdot \frac{E_f}{E_s} \right)^{0,3} \cdot b_w \cdot d$ <p>gdzy $a/d > 2,5$ $V_c'' = 2,5 \frac{d}{a} V_c$</p>

Tabela 1 (cd.). Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP będące modyfikacją metod stosowanych w konstrukcjach żelbetowych

Table 1 (cont.). The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which are modification of design equations for the steel reinforced construction

Lp.	Procedura	Wzór
14.	CSA S6-06 [6]	$V_c = 2.5 \cdot \beta \cdot f_{cr} \cdot b_w \cdot d_v \cdot \sqrt{E_f / E_s}$ $\beta = \frac{0,4}{(1 + 1500\varepsilon_x)} \cdot \frac{1300}{(1000 + s_{ze})}$ <p>gdzie:</p> $f_{cr} = 0,4\sqrt{f_c}$ $\varepsilon_x = \frac{M / d_v + V}{2 \cdot E_f \cdot A_f}$ $s_{ze} = \frac{35d_v}{15 + a_g}$ $d_v = 0,9 \cdot d$
15.	Hoult i in. (2008) [20]	$V_c = \frac{0,3}{0,5 + (1000 \cdot \varepsilon_x + 0,15)^{0,7}} \cdot \frac{1300}{(1000 + s_{ze})} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d_v$ <p>gdzie:</p> $\varepsilon_x = \frac{M / d_v + V}{2 \cdot E_f \cdot A_f}$ $s_{ze} = \frac{31,5d}{15 + a_g}$ $d_v = 0,9 \cdot d$
16.	Jang i in. (2012) [23]	$V_c = \beta_f \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d$ <p>gdzie:</p> $\beta_f = 0,716 + 0,466 \cdot \frac{E_f}{E_s} - 0,095 \cdot \frac{a}{d} + 32,101 \cdot \rho_f$

Tabela 1 (cd.). Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP będące modyfikacją metod stosowanych w konstrukcjach żelbetowych

Table 1 (cont.). The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which are modification of design equations for the steel reinforced construction

Lp.	Procedura	Wzór
17.	Lignola i in. (2012) [30]	$V_c = c \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^n \cdot C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100\rho_f \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot b_w d$ <p>gdzie:</p> $C_{Rd,c} = \begin{cases} 0,18 & \text{dla betonu_zwyklego} \\ 0,12 & \text{dla betonu_lekkiego} \end{cases}$ $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d[\text{mm}]} } \leq 2,0$ <p>Zaproponowano: $c = 1,65$ i $n = 0,6$</p>
18.	Kurth (2012) [27]	$V_c = \beta \cdot \frac{1}{413} \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot f_c)^{1/3} \cdot b_w d$ <p>gdzie:</p> $\beta = 3 \frac{d}{a}$ $\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{d[\text{mm}]} }$
19.	Yousif (2015) [48]	$V_c = 0,29 \mu \rho_f^{\frac{3}{8}} b_w \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{\frac{1}{3}} \left(1 + \frac{d}{a} \right) \sqrt{\frac{f_c d_0 d}{1 + \frac{d_0}{d}}}$ <p>gdzie:</p> $d_0 = k (f_c)^{-\frac{2}{3}}$ $k = 27,3 \sqrt{a_g} \quad \text{gdy maksymalny wymiar kruszywa } (a_g) \text{ jest znany, w przeciwnym wypadku przyjmuje się } k = 120,7 (a_g = 17[\text{mm}])$ <p>Zalecane przyjęcie $\mu = 10$ do celów projektowych.</p>

Tabela 1 (cd.). Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP będące modyfikacją metod stosowanych w konstrukcjach żelbetowych

Table 1 (cont.). The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which are modification of design equations for the steel reinforced construction

Lp.	Procedura	Wzór
20.	Thomas i in. (2016) [42]	$V_c = k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_c \cdot b_w \cdot d$ <p>gdzie:</p> $\tau_c = \frac{0,85 \sqrt{0,8 f_c} (\sqrt{1 + 5\beta} - 1)}{6\beta}$ $\beta = \frac{0,8 f_c^*}{p_t} > 1,0$ $f_c^* = 1,25 f_c$ $k_1 = \begin{cases} 2,5d/a + 0,12 & \text{gdy } a/d \leq 2,5 \\ 1,0 & \text{gdy } a/d \geq 2,5 \end{cases}$ $k_2 = \begin{cases} 1,0 & \text{gdy } d \leq 300\text{mm} \\ \frac{750}{450 + d} & \text{gdy } d > 300\text{mm} \end{cases}$ $p_t = \rho_f \frac{E_f}{E_s}$

2.2. Procedury będące modyfikacją metod stosowanych w elementach zbrojonych prętami FRP

Drugą grupę procedur stanowią modyfikacje istniejących wzorów na ścinanie elementów betonowych ze zbrojeniem kompozytowym, wykonane w celu uzyskania jak najlepszej zgodności z wynikami badaniami eksperymentalnymi (tabela 2). W pracy [14] zaproponowano optymalizację wzoru z amerykańskich wytycznych z 2003 roku [2] polegającą na zmianie wpływu stosunku sztywności zbrojenia kompozytowego i stalowego (poz. 1, tabela 2). Nową zależność określono na podstawie wyników badań eksperymentalnych, w których ustalono, że nośność na ścinanie belek zbrojonych prętami kompozytowymi w stosunku do belek zbrojonych stalą jest proporcjonalna do pierwiastka sześciennego z ilorazu osiowej sztywności zbrojenia FRP i stalowego ($\sqrt[3]{\rho_f E_f / \rho_s E_s}$). Modyfikację wzoru wg kanadyjskiej normy z 2002 roku [7] przedstawiono w publikacjach [37] (poz. 2, tabela 2), [38] (poz. 3, tabela 2) oraz końcowo w kanadyjskiej normie z 2012 roku [8] (poz. 4, tabela 2). Zmiany polegały między innymi na wyeliminowaniu zaobserwowanych sprzeczności w obliczeniach wg wzoru normy [7],

m.in. zerowa nośność na ścinanie przekrojów betonowych bez zbrojenia lub nieracjonalnie małe wartości nośności dla elementów z małym stopniem zbrojenia. Ponadto w nowych formułach ujęto wpływy niektórych parametrów na nośność na ścinanie na podstawie innych procedur: np. przyjęto wpływ momentu zginającego w analizowanym przekroju jak w amerykańskiej normie [1] lub wpływ smukłości ścinania jak w pracy [50]. Modyfikacji istniejących procedur, mającej na celu uzyskanie jak najlepszej zgodności z wynikami badań, dokonano także w pracy [39] (poz. 5, tabela 2). Do prowadzonych analiz wykorzystano algorytmy genetyczne bazujące na procesach ewolucji biologicznej. Modyfikacji poddano m. in. wzór wg amerykańskich wytycznych z 2006 roku [3] oraz wzór wg kanadyjskiej normy z 2002 roku [7].

Podstawowym kierunkiem zmian, podjętych w wyniku porównania istniejących procedur obliczeniowych nośności na ścinanie elementów zbrojonych prętami kompozytowymi z wynikami badań doświadczalnych i zaobserwowanych rozbieżności, była przede wszystkim redukcja wpływu poszczególnych parametrów na nośność na ścinanie (np. przez zmianę wykładnika potęgi przy analizowanym parametrze). Warto zauważyć, że analiza i modyfikacje istniejących procedur wg normy kanadyjskiej [7] przyczyniły się do wprowadzenia nowego wzoru na nośność na ścinanie w kolejnej wersji normy [8].

Tabela 2. Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP będące modyfikacją metod stosowanych w elementach zbrojonych prętami FRP

Table 2. The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which are modification of design equations for the FRP reinforced construction

Lp.	Procedura	Wzór
1.	El-Sayed i in. (2005) [14]	$V_{c,f} = \left(\frac{\rho_f E_f}{90 \beta_1 f_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\sqrt{f_c}}{6} b_w d \right) \leq \frac{\sqrt{f_c}}{6} b_w d$ <p>gdzie: β_1 jak w poz. 8, Tabela 1</p>
2.	Razaqpur i in. (2006) [37]	$V_c = 0,035 k_m k_s k_a (1 + k_r) \sqrt{f_c} b_w d \leq 0,2 k_s \sqrt{f_c} b_w d$ <p>gdzie:</p> $k_m = \left(\frac{Vd}{M} \right)^{\frac{2}{3}}; k_r = (E_f \rho_f)^{\frac{1}{3}}$ $k_a = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{2,5}{M/Vd} \end{array} \right\}; k_s = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{750}{450 + d} \end{array} \right\}$

Tabela 2 (cd.). Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP będące modyfikacją metod stosowanych w elementach zbrojonych prętami FRP

Table 2 (cont.). The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which are modification of design equations for the FRP reinforced construction

Lp.	Procedura	Wzór
3.	<p>Razaqpur i in. (2010) [38]</p>	$V_c = 0,045 \cdot k_m^* \cdot k_a \cdot k_r^* (f_c)^{1/3} \cdot b_w \cdot d$ <p>gdzie:</p> $k_m^* = \left(\frac{V \cdot d}{M} \right)^{1/2}$ $k_a = \begin{cases} 1,0 & \text{dla } \left(\frac{M}{V \cdot d} \right) \geq 2,5 \\ \left(\frac{2,5}{M / (Vd)} \right) & \text{dla } \left(\frac{M}{V \cdot d} \right) < 2,5 \end{cases}$ $k_r^* = 1 + (E_f \cdot \rho_f)^{1/3}$
4.	<p>CSA S806-12 [8]</p>	$V_c = 0,05 \lambda k_m k_r \sqrt[3]{f_c} b_w d_v$ <p>gdzie:</p> $k_m = \sqrt{\frac{Vd}{M}} \leq 1,0$ $k_r = 1 + (E_f \rho_f)^{1/3}$ $d_v = \max(0,9d; 0,72h)$ <p>oraz spełniony warunek:</p> $0,11 \sqrt{f_c} b_w d_v \leq V_c \leq_v 0,22 \sqrt{f_c} b_w d_v$ $f_c < 60MPa$

Tabela 2 (cd.). Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP będące modyfikacją metod stosowanych w elementach zbrojonych prętami FRP

Table 2 (cont.). The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which are modification of design equations for the FRP reinforced construction

Lp.	Procedura	Wzór
5.	Shahnewaz i in. (2016) [39]	CSA 806-02: $V_c = 0,11 \cdot b_w \cdot d \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^{0,4} f_c^{0,13} (\rho_f E_f)^{0,33}$ lub $V_c = 0,12 \cdot b_w \cdot d \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^{0,83} f_c^{0,3} (\rho_f E_f)^{0,3}$ ACI 440.1R-06: $V_c = 1,75 \cdot f_c^{0,28} \cdot b_w \cdot d \cdot k$ gdzie: $k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$ $n_f = \frac{E_f}{E_c}$

2.3. Procedury opracowane na podstawie wyników badań eksperymentalnych oraz z wykorzystaniem specjalistycznych analiz

Trzecią grupę procedur obliczeniowych dotyczących elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi FRP stanowią wzory bazujące na wynikach badań eksperymentalnych elementów ścinanych niewymagających zbrojenia poprzecznego oraz na wynikach analiz zebranych wyników badań za pomocą specjalistycznych narzędzi analitycznych i numerycznych (tabela 3). W przeglądzie pominięto niektóre wzory, które autorzy uznali za niepraktyczne z projektowego punktu widzenia, np. podane w pracach [16], [29], [35].

W pracy [44] podano metodę obliczania nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP, która została opracowana w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych (poz. 1, tabela 3). Zaproponowany model odnosi się do statycznie obciążonych elementów o smukłości ścinania $a/d > 2,7$ i został zaadaptowany do amerykańskich wytycznych [3], [4]. W pracy [5] na podstawie badań ustalono związek pomiędzy obciążeniem rysującym (moment krytyczny) a nośnością na ścinanie elementów zbrojonych podłużnie prętami kompozytowymi. Następnie uwzględniono wpływ smukłości ścinania, modułu i stopnia zbrojenia kompozytowego oraz wysokości użytecznej przekroju przy

wykorzystaniu analizy regresji wyników badań własnych i obcych (poz. 2, tabela 3). W pracy [31] zaproponowano prosty model obliczeniowy bazujący na wynikach badań obcych na ścinanie belek betonowych zbrojonych prętami FRP (poz. 4, tabela 3). Jako główne założenie modelu obliczeniowego przyjęto, że tuż przed zniszczeniem elementu siła poprzeczna jest przenoszona głównie przez niezarysowaną część przekroju w strefie ściskanej. W związku z tym pozostałe mechanizmy przenoszące siłę ścinającą są pomijane, a wzór wyznacza niższą wartość niż rzeczywista nośność na ścinanie. Kolejno w pracy [45] zaproponowano model bazujący na wynikach badań obcych na ścinanie belek betonowych zbrojonych prętami FRP (poz. 5, tabela 3). Wyznaczenie nośności na ścinanie opiera się na określeniu średnich wartości naprężeń ścinających w strefie ściskanej przekroju (jako funkcji wytrzymałości betonu na rozciąganie). W analizach założono kąt zarysowania elementu wynoszący 45° . Na podstawie badań zaobserwowano, że jeżeli kąt zarysowania jest mniejszy niż założony to nośność na ścinanie maleje. Zjawisko to uwzględniono poprzez wpływ smukłości ścinania (a/d). Wpływ właściwości kompozytowego zbrojenia podłużnego określono poprzez zastosowanie współczynnika uwzględniającego stosunek modułów sztywności zbrojenia FRP i stali oraz stopień zbrojenia elementu.

Wykorzystując programowanie genetyczne i bazę wyników badań obcych w pracy [25] zaproponowano wzór na określenie nośności na ścinanie. Metoda analizy opiera się na uogólnionych algorytmach genetycznych bazujących na zasadach ewolucji biologicznej i dziedziczności (np. mutacje, wymiana materiału genetycznego) i polega na zdefiniowaniu problemu, którego rozpoznanie i rozwiązanie następuje w sposób zautomatyzowany przy wykorzystaniu programu komputerowego. W przeprowadzonej analizie uwzględniono sześć parametrów: wytrzymałość betonu na ściskanie, szerokość i wysokość użyteczną przekroju, smukłość ścinania, stopień zbrojenia i stosunek modułów sztywności zbrojenia kompozytowego i stalowego. Otrzymany wzór ma zastosowanie w przypadku elementów o smukłości ścinania $a/d > 2,5$ (poz. 3, tabela 3). W pracy [9] opracowano wzór na nośność na ścinanie wykorzystując metodę regresji wielokrotnej. W analizach uwzględniono następujące parametry: wytrzymałość betonu na ściskanie, szerokość i wysokość użyteczna przekroju, smukłość ścinania, stopień zbrojenia i moduł sprężystości zbrojenia FRP (poz. 6, tabela 3). Określono wstępny model statystyczny, w którym każdemu z analizowanych parametrów przypisano współczynniki stanowiące mnożnik i wykładnik danego parametru. W analizach pominięto interakcję poszczególnych parametrów. Wykorzystując regresję wielokrotną bazującą na danych z eksperymentalnych badań obcych wyznaczono wartości współczynników określających wpływ danego parametru. W pracy [35] opracowano wzór na ścinanie stosując systemy rozmyte, opierające się na procesie mapowania założonych zmiennych wejściowych z danymi wyjściowymi przy wykorzystaniu logiki rozmytej. Na podstawie bazy danych badań obcych uwzględniając wpływ parametrów: wytrzymałość betonu na ściskanie, szerokość i wysokość użyteczna przekroju, smukłość ścinania, sto-

pień zbrojenia i moduł sprężystości zbrojenia FRP, zaproponowano nowy model obliczeniowy. Otrzymanego wzoru nie przytoczono w artykule ze względu na jego duży stopień skomplikowania. Kolejno w pracy [29] do określenia nośności na ścinanie wykorzystano sztuczne sieci neuronowe, dzięki którym możliwe jest sklasyfikowanie danych oraz określenie relacji naśladujący działanie biologicznych struktur mózgowych pomiędzy założonymi danymi wejściowymi i wyjściowymi. Wykorzystując sieci neuronowe na podstawie bazy danych dostępnych w literaturze, uwzględniając wpływ parametrów: wytrzymałość betonu na ściskanie, szerokość i wysokość użyteczna przekroju, smukłość ścinania, stopień zbrojenia i moduł sprężystości zbrojenia FRP, opracowano model obliczeniowy, którego podobnie jak w poprzednim przypadku nie przytoczono w zestawieniu w tabeli 3 z tych samych powodów. W końcu w pracy [16] przedstawiono propozycję modelu obliczeniowego z wykorzystaniem metod programowania w oparciu o biogeografię. Programowanie w oparciu o biogeografię jest matematycznym modelem opisującym relację pomiędzy danymi wejściowymi i wyjściowymi w oparciu o opis sposób rozmieszczenia gatunków roślin i zwierząt (m.in. migracje, powstawanie i wymieranie gatunków). W analizach uwzględniono następujące parametry z eksperymentalnych badań obcych: wytrzymałość betonu na ściskanie, szerokość i wysokość użyteczna przekroju, smukłość ścinania, stopień zbrojenia i moduł sprężystości zbrojenia FRP. Otrzymanego wzoru nie przytoczono ze względu na jego duży stopień skomplikowania [17, 28].

Tabela 3. Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP opracowane na podstawie wyników badań eksperymentalnych oraz z wykorzystaniem specjalistycznych analiz

Table 3. The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which were developed based on experiment database and advanced calculation tools

Lp.	Procedura	Wzór
1.	Tureyen i in. (2003) [44] (ACI 440.1R-06 [3], ACI 440.1R-15 [4])	$V_c = \frac{2}{5} k \sqrt{f_c} b_w d$ gdzie: $k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f; \quad n_f = \frac{E_f}{E_c}$
2.	Alam (2010) [5]	$V_c = \frac{0,2 \cdot \lambda}{(a/d)^{2/3}} \left(\frac{\rho_f E_f}{d} \right)^{1/3} \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d$ przy czym: $\frac{0,1 \cdot \lambda}{a/d} \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \leq V_c \leq 0,2 \cdot \lambda \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d$

Tabela 3 (cd.). Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP opracowane na podstawie wyników badań eksperymentalnych oraz z wykorzystaniem specjalistycznych analiz

Table 3 (cont.). The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which were developed based on experiment database and advanced calculation tools

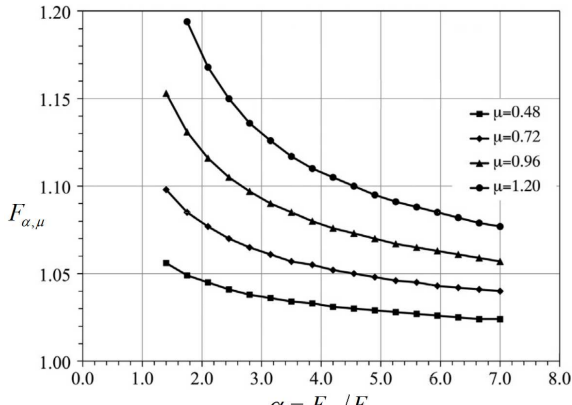
Lp.	Procedura	Wzór																																								
3.	<p>Kara (2011) [25]</p>	$V_c = \left(\frac{c_0}{c_2} \right) \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{d}{a}} \cdot f_c' \cdot \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_s} \cdot \left(\frac{c_1^2}{c_0} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d$ <p>$c_0 = 7,696, c_1 = 7,254, c_2 = 7,718$</p> <p>$\frac{a}{d} > 2,5$</p>																																								
4.	<p>Mari i in. (2013) [31]</p>	$V_c = 0,682 \cdot f_{ct} \cdot b_w \cdot F_{\alpha,\mu} \cdot c_l \cdot \sqrt{1 + \frac{0,85 \cdot M}{b_w \cdot c_l \cdot (d - c_l/3) \cdot f_{ct}}}$ <p>gdzie:</p> $\mu = \frac{M}{f_{ct} \cdot b_w \cdot d^2}$ $\alpha = \frac{E_f}{E_c}$ $c_l = \alpha \cdot \rho_f \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha \cdot \rho_f}} \right) \cdot d$ <p>$F_{\alpha,\mu}$ - wartość odczytana z wykresu:</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data points from the graph of $F_{\alpha,\mu}$ vs $\alpha = E_f/E_c$</caption> <thead> <tr> <th>$\alpha = E_f/E_c$</th> <th>$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=0.48$)</th> <th>$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=0.72$)</th> <th>$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=0.96$)</th> <th>$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=1.20$)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.5</td> <td>1.05</td> <td>1.10</td> <td>1.15</td> <td>1.20</td> </tr> <tr> <td>2.0</td> <td>1.04</td> <td>1.08</td> <td>1.13</td> <td>1.18</td> </tr> <tr> <td>3.0</td> <td>1.03</td> <td>1.06</td> <td>1.11</td> <td>1.16</td> </tr> <tr> <td>4.0</td> <td>1.025</td> <td>1.05</td> <td>1.09</td> <td>1.15</td> </tr> <tr> <td>5.0</td> <td>1.02</td> <td>1.045</td> <td>1.08</td> <td>1.14</td> </tr> <tr> <td>6.0</td> <td>1.018</td> <td>1.04</td> <td>1.075</td> <td>1.135</td> </tr> <tr> <td>7.0</td> <td>1.015</td> <td>1.038</td> <td>1.07</td> <td>1.13</td> </tr> </tbody> </table>	$\alpha = E_f/E_c$	$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=0.48$)	$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=0.72$)	$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=0.96$)	$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=1.20$)	1.5	1.05	1.10	1.15	1.20	2.0	1.04	1.08	1.13	1.18	3.0	1.03	1.06	1.11	1.16	4.0	1.025	1.05	1.09	1.15	5.0	1.02	1.045	1.08	1.14	6.0	1.018	1.04	1.075	1.135	7.0	1.015	1.038	1.07	1.13
$\alpha = E_f/E_c$	$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=0.48$)	$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=0.72$)	$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=0.96$)	$F_{\alpha,\mu}$ ($\mu=1.20$)																																						
1.5	1.05	1.10	1.15	1.20																																						
2.0	1.04	1.08	1.13	1.18																																						
3.0	1.03	1.06	1.11	1.16																																						
4.0	1.025	1.05	1.09	1.15																																						
5.0	1.02	1.045	1.08	1.14																																						
6.0	1.018	1.04	1.075	1.135																																						
7.0	1.015	1.038	1.07	1.13																																						

Tabela 3 (cd.). Procedury obliczeniowe nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP opracowane na podstawie wyników badań eksperymentalnych oraz z wykorzystaniem specjalistycznych analiz

Table 3 (cont.). The shear prediction models of FRP reinforced concrete members, which were developed based on experiment database and advanced calculation tools

Lp.	Procedura	Wzór
5.	Valivonis i in. (2015) [45]	$V_c = \frac{\varphi_{c2} \cdot \varphi_f \cdot f_{ct} \cdot b_w \cdot d^2}{a} \geq \varphi_{c3} \cdot \varphi_f \cdot f_{ct} \cdot b_w \cdot d$ $\varphi_f = 0,4 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{\rho_f}$ $a \leq \frac{\varphi_{c4}}{\varphi_{c3}} d$ $\varphi_{c2} = 2,0; \varphi_{c3} = 0,45; \varphi_{c4} = 1,5$
6.	Chowdhury i in. (2015) [9]	$V_c = -0,223 + 0,19 \cdot b_w + 9,433 \cdot \sqrt{f_c} + (1,63 \cdot 10^{-10}) \cdot d^4 +$ $+ 2,63 \cdot \sqrt{E_f} - 37,571 \cdot \left(\frac{a}{d} \right)^{2/3} + 12,966 \cdot \rho_f$

Modele opracowane na podstawie analizy wyników badań opierały się głównie na opisie przenoszenia siły poprzecznej przez strefę ściskaną betonu niezarysowanego lub analizie momentu krytycznego, tj. obciążenia powodującego zarysowanie przekroju. W przypadku procedur opracowanych z wykorzystaniem specjalistycznych narzędzi zwykle zakładano parametry uwzględniane w większości wzorów dotyczących elementów zbrojonych prętami kompozytowymi i w sposób zautomatyzowany ustalano stopień i sposób ich wpływu na nośność na ścinanie w oparciu o bazę danych wejściowych i wyjściowych. Warto jednak zauważyć, że pomimo wykazania dobrej zgodności zaproponowanych wzorów z wynikami badań doświadczalnych, mają one często skomplikowaną, a tym samym niepraktyczną w zastosowaniu formułę.

3. Wpływ głównych parametrów przekroju poprzecznego elementu na jego nośność na ścinanie

Na podstawie analizy przedstawionych procedur obliczeniowych można wyróżnić sześć podstawowych parametrów przekroju poprzecznego uwzględnianych we wzorach na nośność na ścinanie elementów ze zbrojeniem kompozytowym niewymagających zbrojenia na ścinanie. Są to: wysokość użyteczna przekroju (d), szerokość elementu (b_w), smukłość ścinania (a/d), stopień zbrojenia elementu (ρ_f), moduł sprężystości zbrojenia podłużnego (E_f) oraz wytrzyma-

łość betonu na ściskanie (f_c). W tabeli 4 pokazano, które z tych parametrów zostały uwzględnione w poszczególnych procedurach obliczeniowych.

Tabela 4. Uwzględnienie poszczególnych parametrów przekroju na jego nośność na ścinanie w danych procedurach obliczeniowych

Table 4. Parameters affecting shear capacity considered in presented models and codes

Lp	Procedura obliczeniowa	Parametr przekroju					
		b	d	a/d	f_c	E_f	ρ_f
Grupa I - Modyfikacje wzorów dotyczących konstrukcji żelbetowych							
1.	Tottori i in. (1993) [43]	+	+	+	+	+	+
2.	JSCE-97 (1997)[24]	+	+	-	+	+	+
3.	Michaluk i in.(1998) [32]	+	+	-	+	+	-
4.	IStructE (1999)[21]	+	+	-	+	+	+
5.	Deitz i in.(2001) [12]	+	+	-	+	+	-
6.	ISIS (2001,2007)[22]	+	+	-	+	+	-
7.	CSA-S806-02[7]	+	+	+	+	+	+
8.	ACI 440.1R-03[2]	+	+	-	+	+	+
9.	ECP 208 (2005)[13]	+	+	-	+	+	+
10.	Wegian i in. (2005) [46]	+	+	+	+	+	+
11.	Guadagnini i in. (2006) [18] (EC2)	+	+	-	+	+	+
	Guadagnini i in. (2006) [18] (BISE)	+	+	-	+	+	-
	Guadagnini i in. (2006) [18] (ACI)	+	+	-	+	+	-
12.	CNR DT 203 – 2006 [11]	+	+	-	+	+	+
13.	Nehdi i in. (2007) [36]	+	+	+	+	+	+
14.	CSA S6-06 [6]	+	+	+	+	+	-
15.	Hoult i in. (2008) [20]	+	+	+	+	+	-
16.	Jang i in. (2008) [23]	+	+	+	+	+	+
17.	Lignola i in. (2012)[30]	+	+	-	+	+	+
18.	Kurth (2012)[27]	+	+	+	+	+	+
19.	Yousif (2015)[48]	+	+	+	+	+	+
20.	Thomas i in. (2016)[42]	+	+	+	+	+	+
Grupa II - Modyfikacje wzorów dotyczących konstrukcji zbrojonych FRP							
1.	El-Sayed i in. (2005) [14]	+	+	-	+	+	+
2.	Razaqpur i in. (2006) [37]	+	+	+	+	+	+
3.	Razaqpur i in. (2010) [38]	+	+	+	+	+	+
4.	CSA S806-12 [8]	+	+	+	+	+	+
5.	Shahnewaz i in. (2016) [39] (CSA)	+	+	+	+	+	+
	Shahnewaz i in. (2016) [39] (ACI)	+	+	-	+	+	+
Grupa III - Modele obliczeniowe powstałe na podstawie badań							
1.	Tureyen i in. (2003) [44] (ACI 440.1R-06 [3], ACI 440.1R-15 [4])	+	+	-	+	+	+
2.	Alam (2010) [5]	+	+	+	+	+	+
3.	Kara (2011) [25]	+	+	+	+	+	+
4.	Mari i in. (2013) [31]	+	+	-	+	+	+
5.	Valivonis i in. (2015) [45]	+	+	+	+	+	+
6.	Chowdhury i in. (2015)[9]	+	+	+	+	+	+

Poniżej dokonano krótkiej analizy wpływu poszczególnych parametrów na nośność na ścinanie elementu zbrojonego prętami FRP.

3.1. Geometria elementu: wysokość użyteczna (d), smukłość ścinania (a/d), szerokość (b_w)

Wzrost wysokości użytecznej przekroju (d) powoduje wzrost kąta nachylenia rysy, a tym samym przyczynia się do zmniejszenia głównych naprężeń rozciągających w strefie ścinania. Zatem wraz ze wzrostem wysokości użytecznej przekroju wzrasta nośność przekroju na ścinanie. Wszystkie przedstawione procedury zakładają wprost proporcjonalną zależność pomiędzy wysokością użyteczną przekroju a nośnością na ścinanie.

W zależności od wartości smukłości ścinania betonowe elementy zbrojone można podzielić na dwie grupy: tzw. belki smukłe, w których stosunek $a/d \geq 2,5$ oraz belki pozostałe, tj. tzw. belki krótkie i belki ściany. Wraz ze wzrostem stosunku (a/d) maleje nośność na ścinanie elementu zbrojonego prętami FRP, jednak charakter wpływu tego parametru może być liniowy lub nie. Liniowy wpływ smukłości ścinania uwzględniono w pracach [23], [27], [42], [43], [48]. W pozostałych przypadkach ten parametr jest uwzględniany w postaci potęgowej o wykładniku: $n = (-1/3)$ w normie [7] i pracach [36] i [46], $n = (-1/2)$ w normie [8] i w pracy [38] oraz $n = (-2/3)$ w pracy [37]. Często zależność ta jest także funkcją siły poprzecznej i momentu zginającego, działających w rozpatrywanym przekroju, m.in. w normach [7], [8] lub pracach [20], [37], [38].

Wszystkie przedstawione procedury obliczeniowe uwzględniają wprost proporcjonalny wpływ szerokości elementu (b) na nośność na ścinanie.

3.2. Stopień zbrojenia podłużnego

Wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia, maleje wysokość i szerokość rysy. Redukcja wysokości rysy powoduje wzrost wytrzymałości na ścinanie przenoszonej przez niezarysowaną część przekroju, a redukcja rozwartości rysy powoduje wzrost nośności na ścinanie przenoszonej w wyniku zakleszczania się krużnicy (ang. *aggregate locking*) oraz w wyniku tzw. efektu klockującego (ang. *dowel action*). W większości wzorów obliczeniowych zależność nośności na ścinanie od stopnia zbrojenia elementu wyrażana jest wykładniczo z potęgą $n = 1/3$. Inaczej stanowią procedury wg wytycznych [2], [3], [11], normy [13] oraz opisane w pracach [23], [31] i [48], gdzie zastosowano stosowano zależność liniową. Natomiast w pracy [45] uwzględniono wpływ stopnia zbrojenia jako wykładnik potęgi o podstawie będącej stosunkiem modułu sprężystości zbrojenia kompozytowego i stalowego $n = E_f/E_s$.

3.3. Moduł sprężystości zbrojenia podłużnego

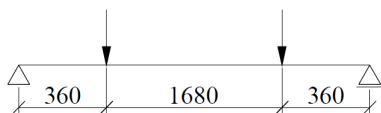
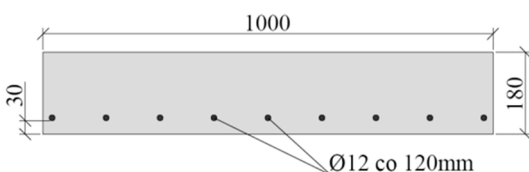
Wpływ modułu sprężystości zbrojenia podłużnego uwzględniano pośrednio za pomocą tzw. sztywności zbrojenia. Sztywność zbrojenia podłużnego jest określana za pomocą iloczynu stopnia zbrojenia podłużnego i modułu sprężystości kompozytu ($\rho_f E_f$). Wraz ze wzrostem sztywności zbrojenia wzrasta nośność na ścinanie elementu. Mniejsza sztywność zbrojenia skutkuje zwiększeniem naprężeń rozciągających w zbrojeniu, co z kolei powoduje zmniejszenie strefy ścisanej betonu i prowadzi do powstawania rys o większej rozwarości, a ostatecznie do zmniejszenia nośności elementu na ścinanie. W wielu procedurach obliczeniowych odwoływano się również do stosunku modułu sprężystości zbrojenia kompozytowego i stali (E_f/E_s). Między innymi w wytycznych [2], normie [13] i pracach [12], [23] i [32] przyjęto liniową zależność pomiędzy modułem sprężystości zbrojenia FRP, a nośnością na ścinanie. Jednak w większości procedur stosowano zależność wykładniczą o potęgze $n=1/3$ (m. in. w normie [7], wytycznych [21], [24], pracach [14], [27], [46], [48]) lub o potęgze $n=1/2$ (m. in. w wytycznych [11] i [22]).

3.4. Parametry wytrzymałościowe betonu

Zniszczenie elementu betonowego w wyniku ścinania następuje równocześnie lub tuż po pojawieniu się rysy ukośnej. Rysa pojawia się w wyniku przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie betonu w kierunku głównych naprężeń rozciągających. W większości procedur obliczeniowych wytrzymałość betonu na rozciąganie jest rozważana jako funkcja wytrzymałości na ściskanie, najczęściej stosowano zależność wykładniczą o potęgze $n=1/3$, m. in. w normie [7], wytycznych [21], [24], pracach [25], [27], [36] lub o potęgze $n=1/2$, m. in. w normie [13], wytycznych [3], [22] i pracach [20], [37], [42], [48]. Warto również zauważyć, że bezpośredni wpływ modułu sprężystości betonu uwzględniono jedynie w procedurze wg amerykańskich wytycznych [3] i [4] oraz w pracy [31].

4. Ilościowe porównanie nośności na ścinanie wg wybranych procedur obliczeniowych

W celu przedstawienia ilościowego różnic w wartościach nośności na ścinanie elementów zbrojonych prętami kompozytowymi bez zbrojenia poprzecznego według różnych procedur obliczeniowych, wykonano obliczenia dla przykładowego zestawu danych wyjściowych (rys. 2). Dla uproszczenia przyjęto zależność $M = V \cdot a$ pomiędzy siłami wewnętrznymi w analizowanym przekroju.

Schemat obciążenia:**Przekrój poprzeczny:****Beton:**

$$f_c = 40,8 \text{ MPa}$$

$$f_{ct} = 3,22 \text{ MPa}$$

$$E_c = 24,7 \text{ GPa}$$

$$a_g = 20 \text{ mm}$$

Zbrojenie:

$$E_f = 50 \text{ GPa}$$

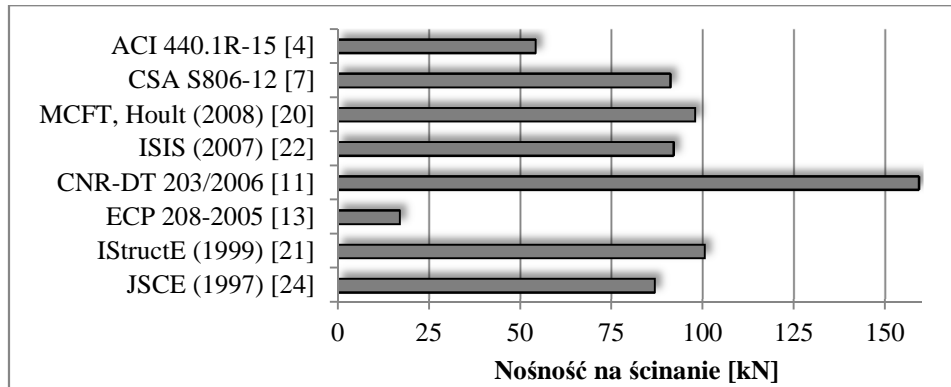
$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

Rys. 2. Geometria i parametry materiałowe płyty betonowej przyjętej do analizy porównawczej (wymiary w mm)

Fig. 2. Geometry and materials characteristic of slab for comparative analysis (dimension in mm)

Porównanie ograniczono jedynie do procedur zawartych w najnowszych wersjach analizowanych norm i wytycznych. Na rys. 3 przedstawiono ilościowe porównanie wartości nośności na ścinanie wg norm: [4], [8], [13] i wytycznych: [11], [21], [22], [24] oraz metody MCFT opisanej w pracy [20].

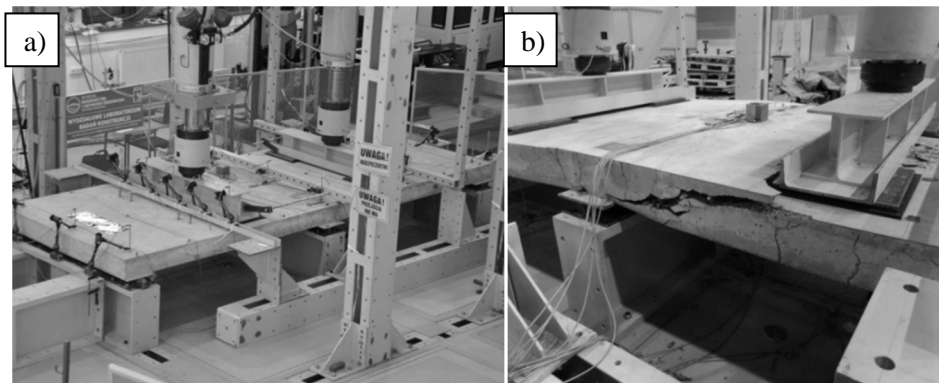
Można zauważyć znaczące rozbieżności wyników uzyskanych według poszczególnych procedur. Najmniejszą wartość uzyskano dla wzoru wg normy egipskiej [13], zaś największą dla procedury wg wytycznych włoskich [11]. Warto zauważyć, że wartości skrajnie różnią się od siebie blisko 9-krotnie. Rażąco mała wartość nośności na ścinanie wg normy [13] wynika z przyjęcia stosunkowo wysokiego porównawczego stopnia zbrojenia stalowego - jest to wartość maksymalna, podczas gdy w przypadku podobnej modyfikacji wzoru dotyczącego konstrukcji żelbetowej według wytycznych amerykańskich z 2003 roku [2] zalecane jest jako porównawcze przyjęcie połowy maksymalnego stopnia zbrojenia stalowego. Wyraźnie odbiegającą wartość od pozostałych uzyskano także dla wzoru wg wytycznych amerykańskich [4]. Nośności na ścinanie według pozostałych analizowanych procedur różnią się między sobą o około 15%. Warto jednak zauważyć, że w publikacji [10] na podstawie bazy danych składającej się z wyników badań dla 157 belek lub płyt wykazano m. in., że wytyczne włoskie [11] przeszacowują nośność na ścinanie, natomiast wytyczne amerykańskie [4] określają zbyt małą wartość w odniesieniu do wyników badań eksperymentalnych. W przypadku analizy procedury wg wytycznych włoskich [11] uzyskano nawet 3-krotnie wyższą wartość nośności obliczonej niż wartość eksperymentalna, natomiast w przypadku amerykańskich wytycznych [4] nośność obliczona była nawet ponad 5-krotnie niższą niż wartość uzyskana z badań doświadczalnych [10].



Rys. 3. Porównanie nośności na ścinanie elementu zbrojonego prętami FRP wyznaczonych wybranymi procedurami obliczeniowymi

Fig. 3. Comparison of shear capacity of concrete member reinforced with FRP bars computed using different shear design procedures

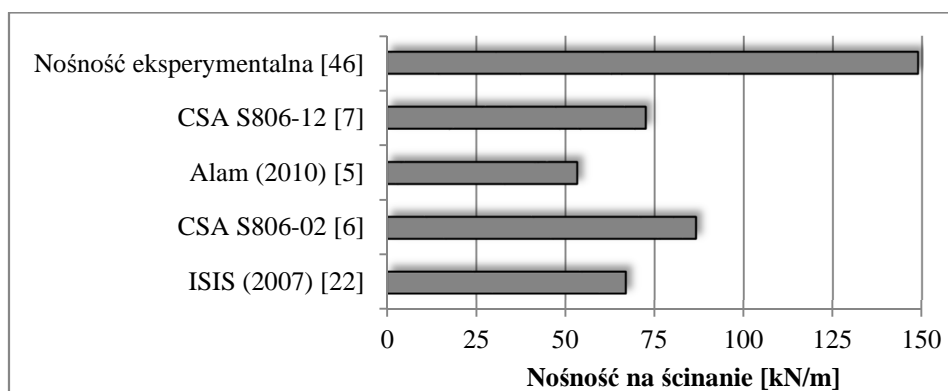
Warto zauważyć, że tylko nieliczne procedury (np. wg norm [7], [8], wytycznych [22] i pracy [5]) pozwalają na uwzględnienie betonu lekkiego poprzez odpowiedni współczynnik redukcyjny, tak jak ma to miejsce w przypadku norm dotyczących konstrukcji żelbetowych m. in. [1] i [15]. Próbę weryfikacji tych procedur autorzy przeprowadzili w oparciu o badania własne opisane w pracy [47]. Badaniu poddano płytę z betonu lekkiego na bazie kruszywa *Pollytag* o grubości 18 cm, zbrojoną prętami GFRP o średnicy 12 mm. Płyta miała schemat dwuprzęsłowy o rozpiętości przęsła 2,4 m i uległa zniszczeniu w wyniku ścinania, a jej nośność na ścinanie wynosiła 148,8 kN/m (rys. 4).



Rys. 4. Badania wytrzymałościowe płyty z betonu lekkiego zbrojonej prętami GFRP: (a) widok stanowiska badawczego; (b) postać zniszczenia na ścinanie [47].

Fig. 4. Structural testing of lightweight concrete slab reinforced with GFRP rebars: (a) view on slab under testing; (b) shear failure of slab [47].

Do analizy obliczeniowej przyjęto pasmo płyty o szerokości 1 m, a wartość współczynnika λ określającego wpływ zastosowania betonu lekkiego przyjęto jako 0,85 - frakcję drobną kruszywa stanowił wyłącznie piasek. Przyjęta wartość współczynnika λ jest jednakowa w przypadku wszystkich analizowanych procedur. Zestawienie wyników analiz obliczeniowych i badań doświadczalnych przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Porównanie nośności na ścinanie płyty z betonu lekkiego uzyskanej eksperymentalnie oraz wybranymi procedurami obliczeniowymi

Fig. 5. Comparison of test result and shear capacity of lightweight concrete slab computed using several shear design procedures

Na rys. 5 można zaobserwować, że wszystkie wyznaczone obliczeniowo nośności są około dwu- lub trzykrotnie niższe niż wartość uzyskana eksperymentalnie. Warto również zauważyć, że wartości obliczone wg przyjętych procedur były mniejsze od wartości eksperymentalnej nośności nawet w przypadku nieuwzględniania wpływu zastosowania betonu lekkiego ($\lambda=1,0$), podając tym samym w wątpliwość zasadność stosowania takiego współczynnika. Jednakże ze względu na bardzo mały zakres przeprowadzonych analiz w tym zakresie, w celu uogólnienia przedstawionych wniosków konieczne jest prowadzenie dalszych prac nad nośnością na ścinanie w przypadku zastosowania betonu lekkiego w elementach zbrojonych prętami kompozytowymi.

5. Podsumowanie

W przeciągu kilku ostatnich dekad, wiele ośrodków naukowych było zaangażowanych w prowadzenie badań i opracowywanie modeli obliczeniowych w celu zrozumienia i jak najlepszego opisu matematycznego zachowania się elementów betonowych zbrojonych podłużnie prętami kompozytowymi. Rezultatem prowadzonych badań i analiz są m.in. liczne wzory, metody i procedury

obliczeniowe pozwalające na wyznaczenie nośności na ścinanie elementów betonowych ze zbrojeniem FRP. Przedstawione w pracy modele w sposób mniej lub bardziej dokładny opisują zjawisko ścinania w odniesieniu do wyników badań eksperymentalnych oraz reprezentują różny stopień złożoności obliczeniowej.

Na podstawie przeprowadzonej analizy dostępnych procedur obliczeniowych można wyróżnić sześć podstawowych parametrów uwzględnianych w modelach opisujących nośność na ścinanie elementów zbrojonych prętami FRP bez zbrojenia poprzecznego. Są to: wytrzymałość betonu na ściskanie, szerokość i wysokość użyteczna przekroju, smukłość ścinania, stopień zbrojenia i moduł sprężystości zbrojenia kompozytowego. W elementach betonowych bez zbrojenia poprzecznego ważną rolę w przenoszeniu siły ścinającej ma także zjawisko zakleszczanie się kruszywa wzdłuż rysy ukośnej (ang. *aggregate interlock*). Zjawisko to może być uwzględnione w modelu poprzez wpływ maksymalnego wymiaru kruszywa w mieszance betonowej. Parametr ten uwzględniono jedynie w dwóch analizowanych procedurach w pracach [20], [48]. Ponadto w żadnej procedurze nie uwzględniono parametrów mających wpływ na zarysowanie się elementu zginanego tj. wpływu przyczepności zbrojenia kompozytowego do betonu jak również liczby prętów i ich rozstawu. Wzorując się na normach dotyczących konstrukcji żelbetonowych m. in. [1] i [15], których procedury pozwalają na uwzględnienie betonu lekkiego poprzez odpowiedni współczynnik redukcyjny w analogiczny sposób uwzględniono wpływ rodzaju zastosowanego betonu w wzorach wg norm [7], [8], wytycznych [22] i pracy [5]. Jednakże uwzględnianie w procedurach obliczeniowych wpływu tego parametru wymaga szerszych badań i analiz.

Określenie uniwersalnej metody szacowania nośności na ścinanie elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi jest trudne ze względu z jednej strony na złożoność opisu mechanizmów zniszczenia, zaś z drugiej strony ze względu na konieczność praktycznego zastosowania proponowanych procedur w projektowaniu - uzyskanie jak najprostszej ich formy. Biorąc pod uwagę znaczne różnice pomiędzy wartościami nośności na ścinanie wyznaczonych wg dostępnych procedur (rys. 2), jak również różny sposób uwzględniania poszczególnych parametrów, można stwierdzić, że zagadnienie ścinania elementów betonowych zbrojonych podłużnie prętami kompozytowymi wymaga dalszych badań i analiz, w szczególności w przypadku elementów wykonanych z betonu lekkiego.

Literatura

- [1] ACI 318:2005 Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005.
- [2] ACI 440.1R-03 Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bar. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2003.

- [3] ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI Committee 440, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006.
- [4] ACI 440.1R-15 Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2012.
- [5] Alam M.S.: Influence of different parameters on shear strength of FRP reinforced concrete beams without web reinforcement, Ph.D. Thesis, Memorial University of Newfoundland, 2010.
- [6] CAN/CSA S6-06 Canadian Highway Bridge Design Code(CHBDC), Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2006.
- [7] CAN/CSAS806-02 Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. CSA, Canadian Standards Association (CSA) International, Toronto, Canada, 2002.
- [8] CAN/CSA S806-12 Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada, 2012.
- [9] Chowdhury M.A., Zahid Z.I., Islam M.M.: Simplified Shear Strength Prediction Model of FRP Reinforced Concrete Beam without Web Reinforcement. First International Conference on Advances in Civil Infrastructure and Construction Materials (CICM 2015), At MIST, Dhaka, Bangladesh, 2015.
- [10] Chowdhury M., Ibna Zahid Z., Islam M.: Development of Shear Capacity Prediction Model for FRP-RC Beam without Web Reinforcement. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2016.
- [11] CNR DT 203 – 2006 Recommendations for the Design, Realization and Control Of Structures In Concrete Reinforced with Fiber-reinforced Composite Bars. Rome, Italy: National Research Council, 2006.
- [12] Deitz D.H., Harik I.E., Gersund H.: One-Way Slabs Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcing Bars,. In *Proceedings, 4th International Symposium Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS4*, Farmington Hills, MI: American Concrete Institut, 1999.
- [13] ECP 208:2005 Egyptian Code of Practice for Design Principles of the Use of Fiber Reinforced Polymers in Construction. Permanent Committee, Code No. 208, Cairo, Egypt, 2005.
- [14] El-Sayed A., El-Salakawy E., Benmokrane B.: Shear strength of concrete beams reinforced with FRP bars: Design method. *Proceedings of the 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures - FRPRCS-7*, 2005.
- [15] EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardisation, Brussels, 2004.
- [16] Golafshani E.M., Ashour A.: A feasibility study of BBP for predicting shear capacity of FRP reinforced concrete beams without stirrups. *Advances in Engineering Software*, 97, 2016.
- [17] Gremel D., Koch R.: Holistic approach to reduce the costs of bridge decks using FRP rebar, <http://www.ktc.uky.edu/> (dostęp: 16.01.2017 r.).

- [18] Guadagnini M., Pilakoutas K., Waldron P.: Shear resistance of FRP RC beams: Experimental study. *Journal of Composites for Construction*, 10 (6), 2006.
- [19] Gurutzeaga M., Oller E., Ribas C., Cladera A., Mari A.: Influence of the longitudinal reinforcement on shear strength of one-way concrete slabs. *Materials and Structures*, vol. 48, no. 8, 2015.
- [20] Hoult N. A., Sherwood E. G., Bentz E. C., Collins M. P.: Does the use of FRP reinforcement change the one-way shear behavior of reinforced concrete slabs?. *Journal of Composites for Construction*, vol. 12, no. 2, 2008.
- [21] Institution of Structural Engineers (IStructE), Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures Using Fibre Composite Reinforcement. IStructE, London, 1999.
- [22] ISIS: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. Design Manual No. 3, Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, Winnipeg, 2007.
- [23] Jang H.S., Kim C.H.: Concrete Shear Strength of Normal and Lightweight Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. Proceedings of The annual International Conference organized by the International Institute for Infrastructure, Renewal and Reconstruction (IIIRR) hosted by Kumamoto University will be held at Kumamoto, Japan, August 24-26, 2012.
- [24] Japan Society of Civil Engineers (JSCE): Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforcing materials. Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 1997.
- [25] Kara I.F.: Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete beams without stirrups based on genetic programming. *Advances in Engineering Software*, 42, 2011.
- [26] Knauff M.: Obliczanie konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [27] Kotynia R., Kaszubska M.: Nośność na ścinanie belek betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi bez zbrojenia poprzecznego w świetle badań obcych. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 12/2016.
- [28] Kurth M., Hegger J.: Experimental and theoretical study on shear capacity of concrete beams with FRP reinforcement. In: Giorgio Monti (Hg.); 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012), Rom, Italien, 13.-15.06.2012.
- [29] Lee S., Lee C.: Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete flexural members without stirrups using artificial neural networks. *Engineering Structures*, 61, 2014.
- [30] Lignola G.P., Nardone F., Prota A., Manfredi G.: Assessment of Design Equation for The Shear Capacity of FRP-RC Members. Proceedings of 6th International Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering, 2012.
- [31] Mari A., Cladera A., Oller E., Bairan J.: Shear design of FRP reinforced concrete beams without transverse reinforcement. *Composites: Part B*, 57, 2014.
- [32] Michaluk R., Rizkalla S., Tadros G., Benmokrane B.: Flexural behavior of one-way concrete slabs reinforced by fiber reinforced plastic reinforcements. *ACI Structural Journal*, 95(3), 1998.

- [33] Mossakowski P.: Pręty z kompozytów polimerowych z włóknami do zbrojenia betonowych konstrukcji inżynierskich. *Drogi i Mosty*, nr 1/2006, s. 35-52.
- [34] Nanni A., De Luca A., Zadeh H.J.: *Reinforced Concrete with FRP Bars*. Mechanics and Design. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
- [35] Nasrollahzadeh K., Basiri M.: Prediction of shear strength of FRP reinforced concrete beams using fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications*, 41, 2014.
- [36] Nehdi M., El Chabi H., Aly Said A.: Proposed shear design equations for FRP reinforced concrete beams based on genetic algorithms approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (12), 2007.
- [37] Razaqpur A.G., Isgor O.B.: Proposed Shear Design Method for FRP Reinforced Concrete Members without Stirrups. *ACI Structural Journal*, 103(1), 2006.
- [38] Razaqpur A.G., Spadea S.: Shear Strength of Reinforced Concrete Elements Brackets with FRP. In: *Proceedings of AIAS, 39th National Congress of Italian Association of Stress Analysis*, Calabria, Italy, 2010.
- [39] Shahnewaz M., Machial R., Alam M.S., Rteil A.: Optimized shear design equation for slender concrete beams reinforced with FRP bars and stirrups using Genetic Algorithm and reliability analysis. *Engineering Structures*, 107, 2016.
- [40] Sherwood G.A., Lubell A.S., Bentz E.C., Collins M.P.: One-Way Shear Strength of Thick Slabs and Wide Beams. *ACI Structural Journal*, vol. 103, Issue 6, 2006.
- [41] Szumigała M., Pawłowski D.: Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojenowych w konstrukcjach budowlanych, *Przegląd Budowlany*, 3/2014.
- [42] Thomas J., Ramadass S.: Parametric Study of Shear Strength of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 97(3), 2016.
- [43] Tottori S., Wakui H.: Shear capacity of RC and PC beams using FRP reinforcement. In: Nanni A, Dolan C, editors. *ACI SP-138*. Detroit, Michigan: American Concrete Inst; 1993.
- [44] Tureyen A.K., Frosch R.J.: Concrete shear strength: another perspective. *ACI Structural Journal*, vol. 10, no. 5, 2003.
- [45] Valivonis J., Budvytis B., Atutis M., Atutis E., Juknevičius L.: Study of shear resistance of fiber-reinforced polymer-reinforced concrete beams. *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7(7), 2015.
- [46] Wegian F.M., Abdalla H.A.: Shear Capacity of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Polymers. *Composite Structure*, 71(1), 2005.
- [47] Wiater A., Rajchel M., Siwowski T.: Badania płyt pomostu z betonu lekkiego zbrojonego prętami kompozytowymi GFRP. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury/ Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, t. XXXII, z. 62 (4/15), październik-grudzień 2015, s. 469-492.
- [48] Yousif A.R.: Shear Strength Of Large FRP-Reinforced Concrete Beams Without Shear Reinforcement. *ZANCO Journal for Pure and Applied Sciences*, vol. 27, no. 3, 2015.
- [49] Zhang T., Visintin P., Oehlers D.: Shear strength of RC beams without web reinforcement. *Australian Journal of Structural Engineering*, vol. 17(1), 2016.

[50] Zsutty T.C.: Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data. ACI Journal Proceedings, vol. 65, no. 11, 1968.

SHEAR CAPACITY OF CONCRETE MEMBERS REINFORCED WITH FRP REBARS IN THE LIGHT OF SELECTED DESIGN PROCEDURES

S u m m a r y

FRP (*fibre reinforced polymer*) rebars due to high strength and excellent corrosion resistance, are a promising alternative for conventional steel reinforcement. The particular issue to be solved in designing of FRP reinforced concrete element is the prediction of shear capacity. Shear behaviour of steel reinforced concrete is a complex phenomenon. When using a FRP composite as reinforcement, the shear mechanism is different due to linearly elastic stress-strain relation and anisotropic bar properties. The main goal of the paper is the revision of the shear design equations for concrete members reinforced with FRP bars without stirrups. The shear prediction models have been grouped into three categories: (I) modification to design equations for the steel reinforced construction, (II) modification existing procedure for FRP reinforced concrete members, (III) new calculation methods based on experiment database and advanced calculation tools. In this study the analysis on different parameters affecting shear strength such as geometry of element, shear span to depth ratio, longitudinal reinforcement ratio, FRP modulus of elasticity and concrete strength have been taken into consideration. The several codes and models in predicting shear strength of concrete members reinforced with FRP rebars have been compared, and the discrepancies and compatibilities have been established. The procedures including reduction factor for lightweight concrete have been also analysed and compared with experimental results from own studies. The result of this research indicates that the shear strength prediction of FRP reinforced members without stirrups needs much more extensive study, especially when lightweight concrete is used.

Keywords: non-metallic reinforcement, FRP composite, shear strength, design procedure, lightweight concrete

Przesłano do redakcji: 24.03.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.

Informacje dodatkowe

1. Lista recenzentów współpracujących będzie opublikowana w czwartym numerze *Czasopisma Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*: 64(4/17) oraz na stronie internetowej:
www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/
(dotychczasowa nazwa: *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*), strona internetowa:
www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/budownictwo-i/
2. Zasady recenzowania są udostępnione na stronie internetowej:
www.oficyna.prz.edu.pl/zasady-recenzowania/
3. Informacje dla autorów artykułów są udostępnione na stronie internetowej:
oficyna.prz.edu.pl/informacje-dla-autorow/
4. Formularz recenzji jest udostępniony na stronie internetowej:
www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/
5. Instrukcja dla autorów omawiająca szczegółowo strukturę artykułu, jego układ, sposób przygotowywania materiału ilustracyjnego i piśmiennictwa jest zamieszczona na stronie internetowej:
www.oficyna.prz.edu.pl/pl/instrukcja-dla-autorow/
oraz
www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/ w zakładce „Instrukcja dla autorów”
6. Dane kontaktowe do redakcji czasopisma, adresy pocztowe i e-mail do przesyłania artykułów oraz dane kontaktowe do wydawcy są podane na stronie internetowej (Komitet Redakcyjny):
www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/

Zasady recenzowania, informacje dla autorów, formularz recenzji, instrukcja dla autorów i dane kontaktowe do redakcji czasopisma i wydawcy będą również opublikowane w czwartym numerze *Czasopisma Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, z. 64 (4/2017).