

Politechnika Lubelska  
Wydział Budownictwa i Architektury

**BUDOWNICTWO  
I ARCHITEKTURA**

Vol. 17(4) 2018

Politechnika Lubelska  
Lublin, 2018

**Politechnika Lubelska**  
**Wydział Budownictwa i Architektury**

# BUDOWNICTWO I ARCHITEKTURA



**Vol. 17(4) 2018**

Politechnika Lubelska  
Lublin, 2018



## Rada Naukowa

Tomasz Bajda (AGH Kraków)  
Ivan Baláž (University of Economics in Bratislava)  
Mykola Bevz (National University Lviv Polytechnic)  
Grażyna Dąbrowska-Milewska (Politechnika Białostocka)  
Wiesława Głodkowska (Politechnika Koszalińska)  
Adam Goliger (The Council for Scientific and Industrial Research - CSIR)  
Zbyněk Keršner (Brno University of Technology)  
Halit Cenani Mertol (Atılım University)  
Carlos M. Mozos (University of Castilla - La Mancha)  
Adam Nadolny (Politechnika Poznańska)  
Sandro Parrinello (Pavia University)  
Stanislav Pospíšil (Institute of Theoretical and Applied Mechanics)  
Wojciech Radomski (Politechnika Łódzka i Politechnika Warszawska)  
Elżbieta Radziszewska-Zielina (Politechnika Krakowska)  
Petro Rychkov (National University of Water Management and Nature Resources Use)  
Shamsher Bahadur Singh (Birla Institute of Technology and Science)  
Anna Sobotka (AGH Kraków)  
Thomas Thiis (Norwegian University of Life Sciences)  
Viktor Tur (Technical University of Brest)  
Tim K.T. Tse (The Hong Kong University of Science and Technology)

## Kolegium Redakcyjne

Redaktor naczelny: **Wojciech Franus**  
Zastępca redaktora naczelnego: **Tomasz Lipecki**  
Zastępca redaktora naczelnego: **Łukasz Borowski**  
Sekretariat: **Agnieszka Woszuik, Olga Skoczylas**

## Adres redakcji:

Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury  
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: [wb.bia@pollub.pl](mailto:wb.bia@pollub.pl)

## Strona czasopisma:

[www.bud-arch.pollub.pl](http://www.bud-arch.pollub.pl)

## Indeksacja:

Arianta, PBN/POLON, Index Copernicus JML, BazTech

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej  
Finansowana w ramach środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego

© Copyright by Politechnika Lubelska 2018

**ISSN 1899-0665**

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej  
Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej  
ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin, email: [wydawca@pollub.pl](mailto:wydawca@pollub.pl)

SPIS TREŚCI  
CONTENTS

<b>Katarzyna Drobek, Bartosz Szostak, Wojciech Królikowski</b> <i>Stocktaking methods of facilities in a state of ruin</i> .....	5
<b>Maciej Trochonowicz, Beata Klimek, Daniel Lisiecki</b> <i>Biological corrosion and vegetation in the aspect of permanent ruin</i> .....	17
<b>Karol Krupa, Piotr Gleń</b> <i>The analysis of spatial and functional modifications of the palace in Krzesimów in Mełgiew commune aiming at adaptation of the building to the requirements of a social welfare home</i> .....	27
<b>Stefan Firlej, Marcin Dębiński</b> <i>Theoretical and practical methodology for recognizing the road surface structure</i> .....	35
<b>Agnieszka Lal</b> Modyfikacja składu granulometrycznego i właściwości geotechnicznych gruntu niespoistego za pomocą dodatku pyłu <i>Modyfication of the grain size distribution and geotechnical properties of the non-cohesive soil by the addition of the silt</i> .....	47
<b>Jerzy Szerafin, Paweł Zaprawa</b> Modelowanie przepływu dyspersji cementowej jako cieczy nieliniowo plastycznie lepkiej <i>Flow modeling of the cement dispersion as non-linear viscoplastic fluid</i> .....	57
<b>Olena Remizova, Natalya Novak</b> <i>Dialogue of epochs in postmodern urban planning concepts of the late XX<sup>th</sup> and early XXI<sup>st</sup> centuries</i> .....	67
<b>Maciej Trochonowicz, Monika Galas</b> <i>Influence of air humidity and temperature on thermal conductivity of wood-based materials</i> .....	77
<b>Mykoła Bevz</b> <i>Zhovkva (Żółkiew) in Western Ukraine – an example of urban complex of the Renaissance “ideal town”</i> .....	87
<b>Maxwell L. Chisala</b> <i>Cement Concrete Mixture Performance Characterization</i> .....	103
<b>Andrzej Flaga</b> Stosunki sił i momentów sił jako kryteria podobieństwa dynamicznego różnych zjawisk występujących w inżynierii wiatrowej, inżynierii śniegowej i dynamice płynów. Część I – Podstawy i zagadnienia ustalone <i>Ratios of forces and forces moments as dynamic similarity criteria of various phenomena occurring in wind engineering, snow engineering and fluid dynamics. Part I – Fundamentals and steady problems</i> .....	121

## **Andrzej Flaga**

Stosunki sił i momentów sił jako kryteria podobieństwa dynamicznego różnych zjawisk występujących w inżynierii wiatrowej, inżynierii śniegowej i dynamice płynów  
Część II – Zagadnienia nieustalone o charakterze okresowym, quasi-okresowym lub turbulentnym

*Ratios of forces and forces moments as dynamic similarity criteria of various phenomena occurring in wind engineering, snow engineering and fluid dynamics*  
*Part II – Unsteady problems of periodic, quasi-periodic and turbulent character* ..... 141

## **Andrzej Flaga, lukasz flaga, piotr krajewski, aleksander pistol**

Badania modeli aeroelastycznych przewodów linii wysokiego napięcia dla różnych przypadków ich ośnieżenia i oblodzenia

*Wind tunnel tests of aeroelastic models of overhead transmission lines under different snow and ice covers* ..... 155

## **Damian Wiśniewski, Milena Selke, Anna Smolińska, Mieczysław Słowik**

Badanie wpływu dodatku granulatu gumowego na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody i mrozu

*Investigation of impact of a crumb rubber granulate addition on the asphalt mixtures resistance to water and frost* ..... 171

## **Aleksandra Joachimowicz, Kamil Nieścioruk**

Analiza rozkładu hałasu w przestrzeni osiedla im. A. Mickiewicza w Lublinie

*Analysis of spatial distribution of noise on Adam Mickiewicz housing estate in Lublin* ..... 181

## **Wacław Seruga**

Miejsca piesze w przestrzeni miasta

*Pedestrian areas in the space of a city* ..... 193

## Stocktaking methods of facilities in a state of ruin

Katarzyna Drobek<sup>1</sup>, Bartosz Szostak<sup>2</sup>, Wojciech Królikowski<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Department of Conservation of Built Heritage, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: k.drobek@pollub.pl*

<sup>2</sup>*Department of Conservation of Built Heritage, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: b.szostak@pollub.pl*

<sup>3</sup>*Lublin University of Technology, e-mail: w.krolikowski@pollub.pl*

**Abstract:** The stocktaking is the basic form of presenting and protecting the object of the historic ruin. It also allows to monitor the behavior state and the degradation progress of an object. Objects in ruin are very specific because they usually do not have elements typical for an existing building. This means that in the case of ruins, methods of stocktaking taken in the same way as in the case of traditional facilities will be insufficient. Elements of objects in ruin often have complicated and diverse geometry, difficult and not completely secure access to all elements. The article presents methods that can be helpful in the stocktaking of such objects. Each method describes the necessary equipment and instruments, the method of taking measurements, accuracy, advantages, and limitations. The paper also presents examples of application for selected methods.

**Keywords:** stocktaking, ruin, monument, photography, 3D scanning, photogrammetry.

### 1. Introduction

The measuring-drawing stocktaking is the most popular, and at the same time the basic form of documentation of monuments. In the case of absence of precise data about the objects in ruin, it is necessary to create their exact stocktaking. Performing measuring documentation precedes activities that involve protection, research, and works on the site. The stocktaking systematically performed also allows to monitor the state of preservation and the extent of the ruin damage.

The stocktaking consists mainly in preparing measuring drawings and describing the current state of the object. It begins with an accurate vision in the field. Only later the stocktaking measurements can be performed. The study must be prepared in an accurate manner, it should take into account all visible deformations, transformations, scratches, cracks, and sometimes transformations of the object over the years and visible details. Its task is to accurately reproduce the actual spatial layout and determination of the technical and functional structure of the ruin.

The stocktaking consists of the following parts:

- situational plan,
- horizontal cross-sections – projections of all floors,
- vertical cross-sections with elevation views,
- detailed drawing documentation of historical details,
- photographic documentation,
- graphic damage documentation,

- technical description containing basic information about the facility,
- description of materials from which individual building elements were made.

At present, despite the huge number of standards (about 40 standards) and regulations (about 5 legal acts) that regulate technical drawing documentation, a lack of a single, detailed standard of the stocktaking is noticeable. Completely different than in the case of the project documentation, architectural and conservation studies, or conservation inspections – the measuring-drawing stocktaking is not included in the quality control. This situation means that the documentation prepared may be incomplete or may have many shortcomings and measurement deficiencies.

## **2. The stocktaking methods**

The accuracy of the stocktaking measurements and the way they are presented depends on the purpose of which the later stocktaking should serve. Depending on the required accuracy, it is possible to choose a measuring variant from several different methods.

The equipment used during the stocktaking makes it possible to obtain measurements of different accuracy. The smallest accuracy in units of measurement has photographic documentation. This is due to the scattered scale of different parts of the image caused by the perspective. The photogrammetry is an alternative to the photographic documentation. The most traditional measurement method is a manual measurement supplemented sometimes with geodetic methods (in the case of complex geometry of objects). The use of manual measurement does not require any special skills or expensive equipment.

The most accurate but also the most expensive method is undoubtedly the 3D laser scanning. The laser scanning requires vast knowledge and skills of both the scanner operator and the person working later with the generated cloud of points.

Methods supplementing the stocktaking will include photographs taken by drones and spherical cameras. With the help of a drone, it is possible to take pictures of building fragments that are not available without the use of specialized equipment, e.g., roofs, chimneys.

### **2.1. Traditional measuring techniques**

The basic method of performing the stocktaking is the traditional manual measurement. This is the oldest, easiest and most time sufficient way of performing measurements for most of the ruins. The accuracy scale is significant for creating the object documentation. For making traditional measurements, tapes, scoops, and laser rangefinders are used. The information obtained should be converted into the drawing documentation by using traditional and computer methods.

As already mentioned, the stocktaking begins with a field vision, then a measuring sketch is prepared. To create horizontal projections, measurements are taken from all the walls of the rooms and their elements, including details. Measurements should be performed at one height. To avoid measurement errors, the so-called „string record” should be used, that is, successively read dimensions from the characteristic points on the wall. It should be remembered that the long walls should be measured twice and the floor level relative to the reference point adopted for the given object or its fragment should be given. The thickness of the walls should be measured in places where the full dimension can be obtained directly or it can be made in sections [15]. In rooms of irregular shape, diagonals should be measured. This allows you to specify a more accurate room geometry.

When performing measurements of the horizontal projections, dimensions are given in the light of all openings and recesses, the height of window sills, and vaults. Door and window openings should be measured both in the light of the opening and the frame. In the direct stocktaking method, it is extremely important to coordinate the projections of all stories with the use of communication divisions and openings. Dimensions should be given only if they have been measured directly and they do not result from calculations.

The facade measurements should be made at the very end, based on projections and designated height of characteristic points. When making the stocktaking drawings of the facade, particular attention should be paid to all kinds of damage, losses, cracks, and secondary materials. It is important to precisely determine their occurrence and describe it accordingly. Both rooms and spaces that are not available for measurement should be marked and described in the drawings, and for elements located at significant heights, the way in which they were drawn is additionally given.

The result of the stocktaking made using the traditional method is the stocktaking note, created during the stay at the facility. It consists of drawings made during measurements together with the dimensions and details drawn. On the basis of the stocktaking note, appropriate documentation of the object is created later.

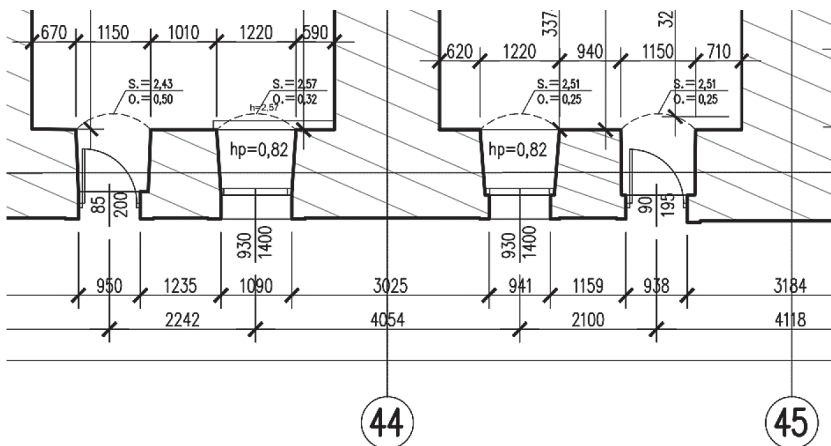


Fig. 1. Fragment of the final stocktaking of the Kłodzko Donjon Fortress – a horizontal cross-section of the “0” storey – the stocktaking made using a computer drawing software.



Photo 1. Traditional measurements of the elevation of the Kłodzko Donjon Fortress

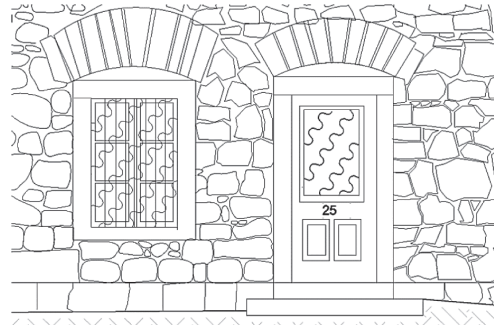


Fig. 2. View of the elevation of the Kłodzko Fortress made after traditional measurements

The traditional method is extremely time-consuming and requires a lot of work, and also does not always give the opportunity to accurately measure all items due to their unavailability. Measurements performed in a manual manner do not give the possibility to map the projection geometry, therefore this method is recommended only for simple objects. There is also a high risk of measuring error by the measuring person. The advantage of the traditional measurement method is the possibility of making a detailed analysis of the structure.

## **2.2. Geodetic method**

The geodetic methods are mainly used to measure the geometry of objects and research on deformations and deflections of the object. In the case of the objects stocktaking, this method is time-consuming, therefore, it is recommended to use the geodetic method only to measure complex geometry, difficult access or significant height of objects.

In the case of the technical condition assessment, the geodetic method is used to investigate all kinds of deformations and displacements of elements in the facility. Using the geodetic equipment with very high accuracy, deviations from the vertical or subsidence of building fragments can be estimated. Currently, it is the most commonly used the displacement survey method. An alternative to this method may be the 3D scanning described in the 2.3 paragraph.

Two geodetic methods can be distinguished to assist in the stocktaking. One of them uses a leveler for this purpose, the other uses a tachymeter. The leveler is a geodetic instrument that allows measuring the height difference between terrain ordinates.

Among the tachymeters, instruments without the use of a mirror are often used for measuring distances. Thanks to them it is possible to determine the geometry of the object and to measure the photogrammetric matrix. Therefore, the reflectorless tachymeter can be used to create an architectural stocktaking.

The object stocktaking using a tachymeter is based on measuring angles and distances. The measurement of the length of the section is possible thanks to the precise laser rangefinder, which is built into the device. The distance is determined from the coordinate increments that are between the measuring instrument and the measured point. The tachymeter has the capability to measure selected points, which define the characteristic places on the site.

The tachymeter combined with the appropriate software can significantly speed up the work and, above all, ensure high accuracy of measurements. Measurements taken with a tachymeter will work to create projections, cross-sections, and simple elevations. It is also possible to create a full stocktaking using this instrument, however, a huge downside of this method is the large amount of time which is needed to spend on the site. In this case, the documentation is created on an ongoing basis, it is also possible to correct any errors on an ongoing basis. Before starting work, the cutting planes should be precisely determined. The result of this are drawings created in computer drawing software, directly on the spot.

The advantage of this method is its precision. Using the tachymeter, in contrast to the traditional method, it is possible to make accurate measurements of large objects. Depending on the model of the reflectorless tachymeter, the range of the instrument is up to 2000 m, and the accuracy, depending on the distance, is approximately 2 to 5 mm. The accuracy of the measurements may vary depending on the material from which the beam will be reflected. With smooth materials (e.g., marble) and with a small angle of incidence of the laser beam, the measurement results can significantly differ from the actual state [8].

The tachymetric method itself is time-consuming, so it would be good to combine two methods, both geodetic and manual measurements. Thanks to the tachymeter, it is possible



to obtain wall geometry, while measuring with a ruler or a rangefinder it is possible to place more accurate elements. By combining these two methods, it is possible to accurately replicate the actual appearance of the ruin.

### 2.3. 3D scanning

The laser scanning, from a technical point of view, is one of the most accurate ways to perform the stocktaking measurements. It is made using a laser scanner. It is used mainly for large, complex objects with a special historical value.

Information obtained in digital form during scanning can be stored on external hard drives. Due to the very high resolution and accuracy of scanning, the cloud of points created is a faithful representation of the real state. The information archived in this way can be used later in other, more detailed works than the general stocktaking. The scan made is at the beginning a collection of points needed to create a model and flat figures. It can be used, e.g., during conservation works related to an architectural detail or a detailed assessment of the technical condition of wall damage.



Photo 2. The Leica ScanStation C10 while taking measurements

The principle of operation of the scanning device is based on measuring the distance of the object from the device. The scanner, thanks to the presence of a special optical system, sends laser beams that are reflected from an obstacle. When returning to the photodiode, information about the reflection time are transmitted, which makes it possible to determine the distance of the point from the device. On this basis, it is possible to write the XYZ coordinates for each point, which, when collected together, creates a spatial collection called as the „cloud of points“. Such cloud of points is a digital representation of the object covered by the stocktaking. After proper data processing, it is possible to create a 3D model of the object scanned [5].

Measurement of many points and their mutual spatial relations is possible thanks to the scanner's rotation around the axis directed perpendicular to the base plane and simultaneous rotation of the head around the parallel axis.

Additional information provided by the laser is the intensity of the light reflection, which allows for differentiation of elements and surfaces in the object measured. Very helpful



when developing the cloud of points, is the ability to take photos by scanning devices. Photo processing processors and the XYZ coordinates assign the RGB (color) values to the points to give the cloud a realistic texture. In fact, the image that is created from the cloud of points becomes an active and three-dimensional model mapped in a 1:1 scale.



Fig. 3. The cloud of points, which was created as a result of the preparation of spatial data obtained from the Leica C10 scanner – the Janowiec castle

The laser scanners provide the opportunity to obtain much more data in a much smaller time interval than measurements performed in traditional ways. The stocktaking made with the use of the 3D scanning allows to create a detailed study, which is of great importance when working on objects in ruin.

The large laser range, depending on the model, enables efficient measurement of large-scale objects. This is a significant asset when making the stocktaking of large assumptions or hard-to-reach due to their location and building area. The density of points acquired facilitates detailed mapping of the wall structure and the geometry of spatial elements. Creation of the cloud of points for the entire facility is possible thanks to combining individual sets with defined field targets or common points determined during processing with dedicated computer software.

The same problem applies to the aforementioned stocktaking methods, the information obtained from laser scanning has to be prepared and presented in the form of technical drawings. However, the probability of making a mistake when mapping geometry or the thickness of building partitions is extremely small.

The main advantage of using the laser scanners is the ratio of working time to accuracy achieved of the mapping of important object parameters. The scanner is so accurate device that it is able to catch anomalies that are not observable with the naked eye. Thanks to this, it is possible to make many useful analyzes and capture places where damage and deformation occur. It is worth remembering, however, that the laser beam is not always able to reach any place and can be reflected from an accidental element.

Due to the accuracy of the 3D scanner, this method is very useful in the process of documenting an object in ruin. The information that can be received through scanning gives the opportunity to use it for various purposes, including design. The ability of changes monitoring

is valuable in the case of objects in ruin, which is why it is important to perform a scan in the largest possible concentration of the cloud of points.

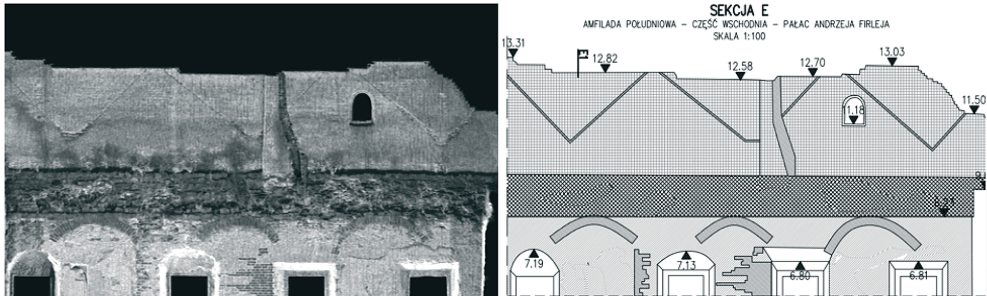


Fig. 3A. View of the facade of the Janowiec castle developed on the basis of a 3D scan

#### 2.4. Photographic documentation (traditional, spherical, using a drone)

The photographic documentation is an indispensable element for conducting a detailed analysis of the facility and complementary material for the drawing documentation.

The pictures should be taken in the best possible resolution and quality. The photographic documentation should also be made using the photogrammetric stocktaking, as a supplement to the measurement information.

Photographic documentation should consist of:

- a list of photos,
- a list of pictures numbered and described in detail,
- a graphic presentation of the plan of photographic positions.

The photo catalog should include photographs made in such a way as to show the general characteristics of the shape, its location in space, all elevations and details. The order of photos should ensure easy orientation in the facility and allow quick location of the photo in the documentation [16].

There are three basic photo sets:

- I – photographs showing the object with the surroundings; including full frames, without cutting the object, showing the context, general characteristics of the solid, its embedding in space, full facades,
- II – photographs showing certain elements of the object, i.e., the entire window or door element
- III – photographs showing close-ups related to the detail, i.e., cracks, discolorations, damage, etc.

Depending on the devices used, the photographic stocktaking can be divided into: traditional photography, spherical photography, and drone photography.

##### 2.4.1. Traditional photography

The traditional photography is made using various types of cameras. The equipment used for taking pictures is selected depending on the user's skills and preferences.

The photographic documentation should present the whole object and its parts, details, characteristic elements, elevations, and elements of architectural decor. Photographs should be taken from characteristic viewpoints to enable the display of the whole object or its fragments.

Photos of the façade, characteristic elements, openings, materials, and wall damage should be made in a similar way to the orthogonal one, in order to avoid distortions of the object. Photographs of details should be made with a clear comparative scale.

### 2.4.2. Spherical photography

It is a modern type of photography. With a view range of 360° horizontally and 180° vertically, it allows to rotate around own axis and document the image down and straight up. It gives the effect of free looking around. In contrast to traditional static photography, which only shows a slice of reality, the spherical photography is not limited by the so-called frame.

The spherical photography is performed using a wide-screen camera, 360° camera, or individual photos can be combined by using computer software. Photographs should be made in such a way as to have control points allowing for the connection of frames. Therefore, it is necessary that each successive overlap in about 20–40%.

Photographs taken by the 360° camera and viewed without using the appropriate software creates a flat image (see Photo 3). The effect of free browsing is possible only with the use of computer software. Photographs are created in a good resolution, which allows for close-ups. By zooming in, the image becomes flat.

The spherical photography is an ideal complementary stocktaking material that also allows to create a virtual walk around the object.



Photo 3. Photograph taken from the 360° camera, flat image view.

### 2.4.3. Photography taken by drone

Unmanned aerial vehicles, i.e., the drones, are remotely controlled by the operator, although there are also models that move completely autonomously. Undoubtedly, they have enormous potential, because they enable to perform many works that are unattainable using traditional methods.

This technology, in the stocktaking of objects in ruin, allows to reach places that are impossible to photograph using traditional photographic documentation methods. Drones allow the whole body to be covered from the top and they are thus helpful in determining the exact shape of the ruin.



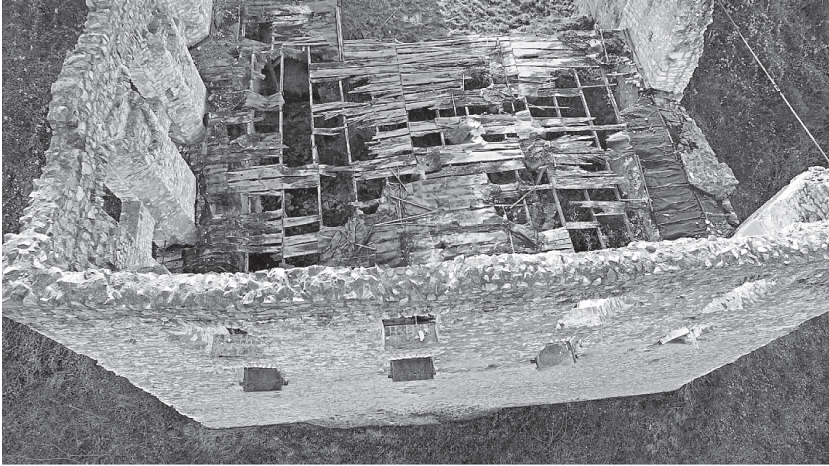


Photo 4. A photo of a wall crown made with the help of a drone.

## 2.5. Photogrammetry

The photogrammetry, like traditional photography, consists in taking pictures with the difference that in the pictures presented there are no geometry disturbances caused by the perspective. Thanks to photogrammetry, it is possible to cover difficult-to-access elements with measurements, because image registration takes place without physical contact with the building [1].

The photogrammetry is a technique for making measurements, recreating shapes, sizes and mutual relations between the location of objects in a given area on the basis of photogrammetric photographs called as the photograms. The image recorded using the photogrammetric method reflects much more information than traditional measurements would have. Therefore, this information is an extremely valuable archival material, especially in the case of objects in ruins [20].

To create a photogrammetric study, the object should be photographed from at least two points. This allows for a mathematical reproduction of the position and orientation of each of these photographs in space, and it is also possible to see the image of the object spatially. In connection with the geodetic determination of coordinates of points reproduced in photographs, it is possible to place the received three-dimensional images in space.

The photogrammetry is an accurate technique for making the stocktaking of objects. If the camera is placed at a distance of 20 m from the object, the measurement accuracy will be 1 cm [19]. The measurements accuracy can be increased by putting the camera closer to the object being tested. The effects of the photogrammetric analysis are vector drawings. This method is extremely helpful in the technical documentation of the façade and the external outline of the building. Photogrammetry allows for precise capture of surfaces decorated with details, which makes it useful in the case of historic buildings.

Facade views made on the basis of this method can serve as a basis for creating chronological stratification at further stages of research, while in the case of restoration and conservation works, they can be used in the stocktaking of damages.

Basically, converting a photogrammetry technique into stocktaking drawings is very time-consuming. The pictures should be drawn each time. The stocktaking created in the

photogrammetry method can also function as plans, because their execution is consistent with the scale of the object.

### 3. Summary

Objects in the state of ruin are quite specific when it comes to the stocktaking. Due to a number of limitations such as: difficult and dangerous access, material diversification, geometric diversity, and specific architectural detail, when developing such documentation, it is necessary to use different methods.

The choice of method depends primarily on the purpose of which the inventory is to be used, but also the availability of specialized equipment and economic conditions (some of the above-mentioned methods are expensive). Methods with traditional manual measurements are by far the most commonly used. Technological progress, however, is increasingly displacing such methods and techniques at the expense of digital methods. More and more often, a specialized 3D scanning is used. Scanning offers great detail, allows to make drawings in a much simpler and faster way. Using the appropriate software, it is possible to generate 3D model from the cloud of points. Such models are currently widely used not only in digital processing, but also in 3D printing.

Geodetic, photographic and photogrammetric methods can be used as complementary methods.

### Bibliography

- [1] Bar E., Faldrowicz J. *Dokumentowanie zabytków architektury metodami fotogrametrycznymi i skaningu laserowego*, Acta Scientifica Academiae Ostroviensis 34 (2010) 5–14,
- [2] Brusaporci S., *The representation of architectural heritage in the digital age, encyclopedia of information science and technology*, Information Resources Management, USA, 2005.
- [3] Brykowska M. *Metody pomiarów i badań zabytków architektury*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
- [4] Centofanti M., Brusaporci S. *Interpretative 3D digital models in architectural surveying of historical buildings, Computational modelling of objects represented in images*. CRC Press, London, 2012.
- [5] Gołębniak A. *Rola nowych technik dokumentacyjno-pomiarowych w interdyscyplinarnych działaniach badawczo-konserwatorskich*, Wiadomości Konserwatorskie 40 (2014) 83–93.
- [6] Gołka J., Haliński J. *Fotogrametria cyfrowa w architekturze – nowe możliwości inwentaryzacji i archiwizacji obiektów*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 10 (2000) 38–1: 38–7.
- [7] Jachimski J. *Fotogrametryczna inwentaryzacja obiektów zabytkowych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 7 (1997) 53–60.
- [8] Klimkowska H., Wróbel A. *Uwagi o wykorzystaniu tachimetrów bezlustrowych w inwentaryzacji architektonicznej*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 16 (2016).
- [9] Kwoczyńska B. *Opracowanie obiektów architektonicznych z wykorzystaniem metod stosowanych w fotogrametrii cyfrowej*, Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, 3 (2010) 65–74.
- [10] Parat M., Schaaf U. *Inwentaryzacja pomiarowo-rysunkowa zabytków architektury drewnianej w procesie konserwatorskim – problemy i propozycja standaryzacji*, Budownictwo i Architektura 14(4) (2015) 99–110.

- 
- [11] Prarat M. *Wykorzystanie tachimetrii i fotogrametrii w dokumentacji zabytków architektury na przykładzie inwentaryzacji pomiarowo-rysunkowej wybranych kamienic toruńskich*, Acta Universitatis Nicolai Copernici 46 (2015) 509–531.
- [12] Szmygin B. *Wprowadzenie, Trwała ruina II. Problemy utrzymania i adaptacji. Ochrona, konserwacja i adaptacja zabytkowych murów*, Lublin–Warszawa, 2010, s. 5–6.
- [13] Tajchman J. *Standardy w zakresie projektowania, realizacji i nadzorów prac konserwatorskich dotyczących zabytków architektury i budownictwa*, Narodowy Instytut Dziedzictwa, Warszawa, 2014.
- [14] Trizio I. *GIS-technologies and Cultural Heritage: stocktaking, documentation and management*. In *Rethinking Cultural Heritage, Experiences from Europe and Asia*, Dresden: Tech-nische Universität Dresden, 2007, s. 75–91.
- [15] Uścińowicz J. *Standards of conservation documentation of wooden architecture facilities as a basis for monitoring and management*, Documentation and the monitoring in managing timber objects in Krzysztof Kluk Museum of Agriculture in Ciechanowiec and the Ryfylke Museum, Krzysztof Kluk Museum of Agriculture in Ciechanowiec, 2015, s. 43–67.
- [16] Wytyczne Techniczne G-3.4, *Inwentaryzacja zespołów urbanistycznych, zespołów zieleni i obiektów architektury*, GUGiK, Warszawa, 1981.
- [17] PN-70/B-02365 – *Powierzchnie budynków – Podział, określenia i zasady obmiaru*.
- [18] PN-ISO9836:1997 – *Właściwości użytkowe w budownictwie – Określenie i obliczanie wskaźników powierzchniowych i kubaturowych*.

### Websites:

- [19] <http://geo-metric.com/fotogrametria-cyfrowa>, data odczytu: 24.07.2018 r.,
- [20] <http://www.wrogeo.pl/pl/fotogrametria.html>, data odczytu: 24.07.2018 r.,



## Biological corrosion and vegetation in the aspect of permanent ruin

Maciej Trochonowicz<sup>1</sup>, Beata Klimek<sup>2</sup>, Daniel Lisiecki<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Department of Conservation of Built Heritage, Faculty of Civil Engineering and Architecture  
Lublin University of Technology, e-mail: m.trochonowicz@pollub.pl*

<sup>2</sup>*Department of Conservation of Built Heritage, Faculty of Civil Engineering and Architecture  
Lublin University of Technology, e-mail: b.klimek@pollub.pl*

<sup>3</sup>*Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology  
e-mail: d.lisiecki@pollub.pl*

**Abstract:** The article presents the mechanisms of biodegradation of structures of historical objects intended for exposure in the form of a permanent ruin, and principles of proceeding in removing undesirable vegetation in these objects. Particular attention was paid to issues related to the diversity of damage caused by living organisms. Rules for the removal of algae, lichens, and fungi as well as the operating procedures for removing unwanted higher plants are presented.

**Keywords:** permanent ruin, biodegradation, biofouling, biocorrosion removal, greenery removal.

### 1. Introduction

There are a number of factors responsible for the degradation processes of objects protected in the form of a permanent ruin. In most cases, these processes are caused by atmospheric factors (water, sun, frost, wind, etc.), factors associated with changes in groundwater conditions, changes in the statics of objects or human activity. A separate group are living organisms inhabiting and overgrowing objects.

The group of organisms responsible for the destruction of ruins includes mainly single and perennial green plants, trees and shrubs, house fungi, mold fungi, algae, lichens, mosses, and insects [3, 9]. In the case of objects left in a form of the permanent ruin, the negative effect of house fungi and insects is of marginal significance. All of the others listed to a lesser or greater extent affect the degradation processes of the ruins.

These organisms are responsible for the phenomenon of biological corrosion, also called the biodeterioration, understood as various forms of destruction of building elements caused by the action of living organisms, so-called the biological pests. There is a distinction between chemical assimilatory and dissimilatory biological corrosion. The first is the most common form of this process and takes place when the material is degraded because of its nutritional value. The second, the chemical dissimilatory biodeterioration (corrosion) occurs when the microbial metabolites damage the material [13].

In the case of masonry, the chemical assimilatory corrosion is of little importance due to the minimal amount of nutrients in the facility. It is limited only to those walls in which wooden elements were used in the structure or wood was used as a material for roofing elements, communication, e.g. bridges and viewpoints on the crown of the walls.



The phenomenon of dissimilatory biological corrosion is of great importance. The fouling of the surface of materials by living organisms, known in the literature as „biofouling” can cause a number of adverse changes inside and on the wall surface, corrosion, pigmentation, secretion of toxic metabolites to the material, and damage to the masonry structure due to root system growth [8].

The development of biological corrosion and vegetation causes a number of adverse changes in the ruin. These changes can be divided into: technical, aesthetic, and hygienic-sanitary. Technical effects mainly consist in lowering the strength of elements and structures, which leads to their slow degradation. The biological corrosion also has aesthetic significance, it consist in lowering the aesthetic values of the elements infected. The hygienic-sanitary effects, consisting in the deterioration of the degree of health of objects for people and animals, in the case of walls in ruin are not significant [12].

From the conservation point of view, the technical effects caused by biological corrosion and vegetation development are by far the most important for the ruins. Therefore, due to the technical nature of the study, in the next part, the greatest emphasis will be placed on the impact of biological corrosion on the degradation processes of ruins, and on the principles of handling the removal of organisms that cause biological corrosion and undesirable vegetation.

## **2. Description of destruction mechanisms**

the mechanism of biodegradation of objects protected in the form of ruins is complex and depends on many factors. The most important are: the material from which it was erected, the construction height and thickness of the walls, a moisture status of the walls, the place where it was erected, the type and size of trees in the immediate vicinity, types of organisms inhabiting the walls, quality of care of the manager, etc. All these factors have a smaller or greater impact on the technical condition of the walls associated with the adverse effects of organisms that cause biological corrosion and the presence of undesirable vegetation.

Due to the large variety of damage caused by living organisms, they were proposed to be divided into three groups. The division takes into account the depth of damage and assigns them groups of organisms responsible for destruction.

- Group I – surface damage/algae, bryophytes, mold fungi, and lichens/
- Group II –damage to the depths and crowns/low vegetation – grass, perennials, and succulents/
- Group III –damage to the structure/high vegetation – trees and shrubs/

### **2.1. Group I – surface damage**

The first group includes damage caused by the development of organisms devoided of root systems or those in which they have a residual form. This group includes algae, lichens, bryophytes, and mold fungi. These organisms usually only cover the surface of the material. Due to different environmental requirements (humidity, pH of a substrate, sun exposure) they can develop in various places and on most materials found in objects.

Algae, bryophytes, and mold fungi have quite high requirements for the moisture of the ground, which is why they grow over the basement strip of the walls and shady places. The largest concentrations of these organisms are observed on the walls from the north. Their habitat is usually natural stones and brick, but they also occur on joints and plasters. Initially,

slow expansion is becoming more and more intense. It is affected by the ability to retain moisture by algae and bryophytes, which leads to even greater moisture content in the substrate. As a consequence, further organisms develop on moist surfaces. Development usually ceases when the humidity conditions change.

Lichens have much lower requirements for a substrate moisture. They are quite resistant to low and high temperatures. Thanks to the possibility of absorbing moisture from the air, they are independent of the ground conditions. They grow stones, bricks, joints, and plasters. Their colors vary widely from bright ones to black. Due to the color of fruiting bodies, they are often treated as a dirt.

The surface damage made by some species of lichens are caused by the secretion of acids and the growth of cells in the pores of the stone. Algae and fungi also secrete organic acids, especially the oxalic acid. Additionally, due to the growth of the fungal hyphae into the pores of materials, their cohesion may be loosened, thus the surface layer is destroyed. In turn, the sulfur bacteria in the metabolic process cause the formation of the sulfuric acid and initiate a series of chemical reactions resulting in cracking and crumbling of materials. The nitrifying bacteria oxidize the ammonia (contained in rainwater, dust, and soot) to the nitric acid, which, e.g., dissolves surface layers of stones creating characteristic stains and craters or so-called the snow blooms [5].

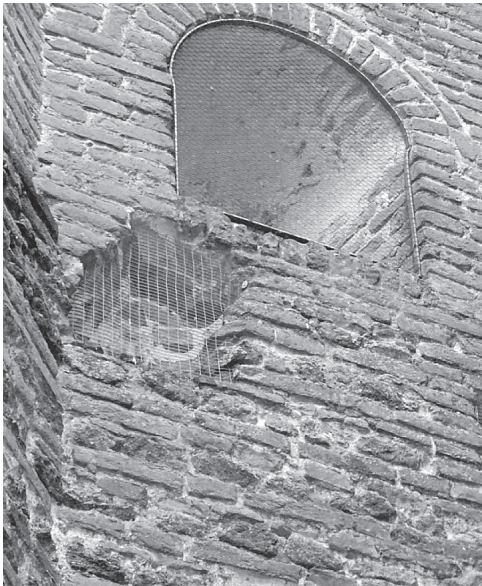


Fig. 1. Algae colonies on a moist ceramic brick wall



Fig. 2. The development of algae and lichen in the corner of the wall directly under the ivy, which is growing the wall and the crown





Fig. 3. A fragment of the plastered ceiling overgrown with lichens

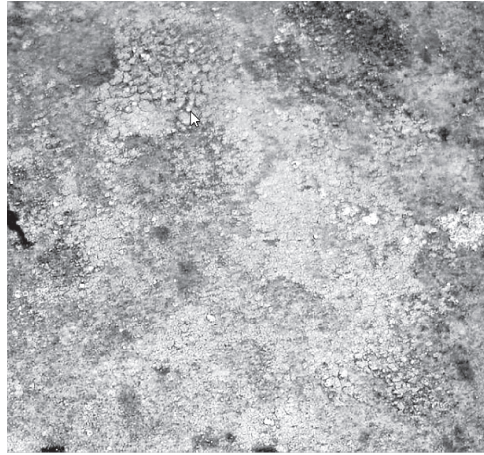


Fig. 4. Colonies of lichens on the historical plaster of the external wall of the object



Fig. 5. Mosses growing on the low crown of the north wall of the ruin



Fig. 6. Moss and algae, which overgrow the crown and the face of the wall

## 2.2. Group II – damage to the depths and crowns

The second group includes deep damage to the surface layers of the wall /face and crown/. Destruction is caused by small plants developing a root system, and consequently requiring a suitable substrate or a place where they can grow. This group includes all species of low vegetation in buildings in ruins: grass, perennials, ivy, and succulents.

The development of green plants begins with the appearance of the minimum amount of humus in the crevices and on the crown of the wall. Initially, mainly small annual plants and grass dominate. Over time, perennial plants appear along with the growth of the humus layer (plant decomposition, wind blowing). Their growth is particularly intense in places where elevated humidity persists, however many species are able to settle dry and sunlit fragments.

The growth and decay of vegetation causes the appearance of the humic acids in the wall and an increase in the amount of nitrates. Acids cause dissolution of binders in the joints, weakening them and, consequently, a number of damage to the face of the wall. The increase in nitrate concentration is responsible for further damage to the surface layers. Crystallizing salts increase their volume and break the pores of welds and masonry materials. The crystallization pressure is so high that damage occurs even in the case of rocks with high hardness.

Another consequence of the development of low vegetation is damage at the interface between the weld and masonry related to the development of the root system. The expanding roots cause damage to weak /mostly lime or clay/ joints, which can lead to further damage to the face layers /individual detachments of small stones or entire fragments.

Chemical substances released by vegetation and derived from their decomposition also affect the discoloration of the face surface causing negative aesthetic effects.



Fig. 7. Photograph of a heavily sunlit southern facade. The development of vegetation in the wall crevices



Fig. 8. Damage to the face of the wall associated with the growth of the root system of low vegetation



Fig. 9. The crown and the face of the curtain wall planted with a single and perennial vegetation



Fig. 10. The expansion of low plants and mosses on the crown of the ceramic brick wall. In the foreground young shrubs are visible





Fig. 11. The low crown of the wall completely overgrown with greenery. The tight layer of humus and greenery prevents evaporation of the moisture retained in the wall



Fig. 12. A wall relic covered with vegetation. A large amount of green causes the illegibility of the ruin

### 2.3. Group III – damage to the structure

The third group includes the large-area damage to the face and wall construction itself. They are caused by perennial plants, which the root system is very extensive and surpasses the walls or vaults of the object. The third group includes trees and shrubs.

The impact of high vegetation on the walls is much greater than in the other groups of organisms described in previous subsections. The roots secrete large amounts of organic acids that cause the decomposition of calcium carbonate in the joints of the masonry walls. This leads to a weakening of the joint-masonry bonds inside the wall. Together with water, these compounds move to the surface, and then after evaporation of water, they crystallize. The crystallization causes sealing of near-surface layers and appearance of carbonate stains.

Falling leaves are found in the crevices and hollows of the wall, and after decomposition they form the basis for the development of low vegetation and bryophytes. In addition, along with water, large amounts of nitrates from the decomposition of leaves enter the wall.

Trees and shrubs also affect the ruin mechanically. The growing roots fill the walls' gaps and cause the emergence of new cracks and surface spalling of stone and brick. Large root systems overwhelming the walls over time can lead to large surface loosening and significant damage to the construction of the entire wall.

The presence of tall trees overgrowing walls or in their immediate surroundings can also be very dangerous during intense storms or strong winds. The tree torn from the roots or broken can lead to significant damage to the ruins or be a threat to the people staying in the facility.

Constant shading of the wall by high vegetation hinders its drying out, which can lead to intensive development of low vegetation, algae, and bryophytes.



Fig. 13. A fragment of the vault intensely overgrown with shrubs



Fig. 14. Stone wall with young birches on the crown



Fig. 15. The rowan rooted in the gap between the wall of the crown and the lintel



Fig. 16. A shrub with a root system overgrowing a ceramic brick wall



Fig. 17. Vault made of ceramic brick damaged by roots



Fig. 18. A huge tree and its root system, which overgrown a stone vault



### 3. Principles of procedure during removing biological corrosion and vegetation

Problems concerning the impact of vegetation on objects in permanent ruin is an open issue, which is dealt with by architects, conservators, and engineers. In a large number of scientific and popular science publications, a separate group consists of guides for managers and guardians of objects [2, 3, 4, 9]. Guidelines indicate the need to consult with specialists before starting any activities related to the treatment of vegetation growing on objects in the permanent ruin.

The removal of organisms responsible for the development of biological corrosion is associated with the need to conduct activities that directly or indirectly can affect the behavior of the ruin itself. Due to the possibility of adverse changes during this work: structural damage, surface damage to the face, damage to the details, change of color, etc., removal of organisms responsible for corrosion should be subjected to specific rules. Due to differences related to the structure of organisms (lack or existence of root systems), the place of occurrence and the type of damage caused by the action of organisms, the rules of conduct were collected in two groups.

#### **Rules for the removal of algae, lichen, mosses, and mold fungi**

- Determination whether existing organisms must be removed or whether their impact on the material is negligible and they can remain.
- Determination the degree of damage and its type.
- Adoption a method of organisms removing. The method must take into account the surface, the availability, the texture of the material, the strength of the subsurface layers, and the degree of damage.
- For mechanical removal, it is necessary to carry out tests of cleaning efficiency and the impact of the method used on the substrate.
- The use of chemical preparations that combat organisms requires determining the effect of the substance on the treated surfaces. The compounds contained in the substance used must not cause changes in the structure, reduce strength or cause changes in the color scheme.
- After cleaning works, the wall surfaces should be disinfected.
- Determination of the time after which the treatments need to be repeated.

#### **Rules for handling unwanted vegetation**

- Before starting the work, review the condition of the walls and determination the places where the work will be carried out should be performed.
- Determination which plant groups are to be removed, in certain cases a decision may be made to leave some plants or their parts (ivy, grass growing on protected wall crowns).
- In the case of the need for work at high altitudes, especially when cutting out trees, works should be outsourced to specialists.
- Annual and perennial plants (grasses, perennials, and weeds) should be removed as much as possible with the whole root system.
- After removing the plants from gaps and depressions, the layers of soil that are located there should be also removed, if possible. This treatment will delay the growth of other organisms in the future.
- Before using chemical preparations, each time it is necessary to determine their impact on the material of the ruin.

- The chemicals used within the ruins must not adversely affect planned vegetation.
- Removal of tall trees both near the walls as well as those with a root system overgrowing the structure must be supported by the analysis of the impact of the cut on the behavior of the walls.
- It is not recommended to remove trunks and roots after tree felling, if they affect the stability of slopes near the walls and the stability of the walls themselves.
- In the case of removal of trees and shrubs, it is necessary to take into account breeding periods of birds.
- After carrying out the cleaning work on the ruin of undesirable greenery, it is recommended to periodically monitor the walls and carry out works preventing fouling.

#### 4. Summary

The development of organisms on the walls of objects protected in the form of the permanent ruin is an unavoidable process. The specificity of these buildings /objects that are not roofed, unheated, and often unused and unprotected/ causes that under favorable conditions that prevail there, the organisms will develop all the time. It is important that this development is not uncontrolled. Depriving the walls of care for only a few years can lead to a series of destructions, often of an irreversible nature.

Therefore, it is crucial that such objects should be subjected to periodic inspections, allowing to carry out cleaning works at the moment when corrosion or vegetation growth occurs. Properly conducted inspection allows to decide which species and specimens should be immediately removed, and which left and treated as an element of arrangement. Cyclical activities will not allow excessive growth of vegetation and reduce the costs of activities related to the removal of vegetation.

#### References

- [1] *Building Research Establishment. Control of lichens, moulds and similar growths.* Garston, Watford: Building Research Establishment, 1992.
- [2] Donnelly J. *Ruins: the Conservation and Repair of Masonry Ruins*, Government Publications Sales Office, Dublin, 2010.
- [3] Eklund J.A., Young M.E. *Biological Growth on Masonry: Identification & Understanding. Inform. Information of historic building owners.* Published by Historic Scotland, January 2013.
- [4] Fawcett R. *Treatment of vegetation at monuments* [in:] *The Conservation of Architectural Ancient Monuments in Scotland. Guidance on Principles.* Published by Historic Scotland. Longmore House. Salisbury Place. Edinburgh 2001, s. 44–47.
- [5] Ferraby S. *The ecology of ruin sites* [in:] *Conservation of Ruins*, ed. John Ashurst, Elsevier Science & Technology, 2006, s. 209–210.
- [6] *Further Reading and Contacts Biological Growths on Sandstone Buildings: Control & Treatment, Technical, Advice & Guidance, Technical Advice Notes*, Historic Scotland, tom 10, 1997.
- [7] Gordon R. *University. Biological Growths, Biocide Treatment, Soiling and Decay of Sandstone Buildings and Monuments in Scotland.* Report on research commissioned. Historic Scotland and The Robert Gordon University, 1995.
- [8] Jasieńko J., Mierzejewska O., Hamrol K., Misztal W. *Utrwalanie koron murów obiektów historycznych przeznaczonych do ekspozycji w formie trwałej ruiny*, *Wiadomości konserwatorskie* 30 (2011) 117–132



- [9] Kozarski P., Molski P. *Zagospodarowanie i konserwacja zabytkowych budowli*. Towarzystwo Przyjaciół Fortyfikacji, Fortyfikacje tom XIV, Warszawa 2001.
- [10] Praca zbiorowa pod redakcją Ważnego J., Karysia J. *Ochrona budynków przed korozją biologiczną Arkady*, Warszawa 2001.
- [11] Quinlan M., Hanna M., Kelly D. *The conservation and repair of masonry ruins*, – Government of Ireland, Dublin, 2010.
- [12] Sieniawska-Kuras A., Potocki P. *Przyczyny zniszczeń obiektów budowlanych i elementów architektonicznych. Procesy biologiczne*. [w:] *Renowacja elementów architektury*. Wydawnictwo i handel książkami „KaBe”, Krosno 2012, s. 53–55.
- [13] Strzelczyk A.B. *Czynniki niszczące kamienie. Czynniki biologiczne* [w:] *Zabytki kamienne i metalowe ich niszczenie i konserwacja profilaktyczna*, red. Wiesław Domasłowski. Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2011, s. 135–157.
- [14] Tajchman J. *Metoda zabezpieczania i rewitalizacji ruin historycznych jako szczególny rodzaj konserwacji i restauracji zabytków architektury*, Materiały z międzynarodowej konferencji naukowej, Gubin 2008.
- [15] Trochonowicz M. *Zamek w Janowcu nad Wisłą. Ocena stanu wilgotnościowego i zasolenia murów*. Politechnika Lubelska, Lublin 2006.
- [16] Young M., Wakefield R. *Research commission investigating biological growths, biocide treatment soiling and decay of sandstone buildings and monuments in Scotland*. 1995.

# **The analysis of spatial and functional modifications of the palace in Krzesimów in Melgiew commune aiming at adaptation of the building to the requirements of a social welfare home**

**Karol Krupa, Piotr Gleń**

*Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology  
e-mail: k.krupa@pollub.pl, glen@pollub.pl*

**Abstract:** The palace in Krzesimów was built in the classicist style at the beginning of 19<sup>th</sup> century. The building is the part of the palace-park complex entered into the register of monuments because of its historical, aesthetical and landscape values. From 1970s, it is the headquarters of a social welfare home. Over the years, this function enforced many changes in the functional layout of the building to adapt it to the needs of people with various types and levels of disability. Despite many minor renovations and modifications, the palace didn't undergo complete overhaul, which would greatly improve the technical condition of the original fabric. This aim of article is to analyse introduced functional changes, which were supposed to facilitate the use of the building by the handicapped, and to consider what actions must be undertaken in order to improve its technical condition. The authors of the paper underline the need to start renovation works on the basis of the archive documentation, as well as conducted survey and research of its current technical condition.

**Keywords:** social welfare home, monument, palace, Krzesimów.

## **1. Introduction**

### **1.1. Social welfare homes**

According to the act on the social welfare of 12<sup>th</sup> march 2004, the term social welfare home designates “social welfare establishment – regional social policy centre, district’s centre for the family support, regional social welfare centre, social welfare home, specialist consultancy centre, including family support, support centre and crisis intervention centre” [1]. The aim of such establishments is to support persons in difficult financial and personal situation, who through no fault of their own can’t cope with life’s challenges [2]. The basic principle of social welfare homes is that their technical conditions and character should fulfil to the most possible extent the needs and capabilities of their residents. They should have cosy, familial character, so that their residents feel comfortable over there [3]. Nowadays social welfare homes are crucial element of the social welfare system. People who use them have often difficulties to be an independent person in the society. They have reduced level of awareness of their actions [4].

The role of an architect in developing the space adapted for the needs of social welfare homes is very important. The design process has to consider the group of its recipients in order to adapt the building for their needs to the maximum possible extent. Results of the surveys concerning the people who live in social welfare homes show that the reason why

people land in this kind of establishments there doesn't lie in the problem of their mental handicap but rather their environment, bereavement or poverty [5]. That is why it is the designer's responsibility to create a place that would be friendly and possibly closest to real home. Adaptation of historical buildings for this purpose is not new issue. The authors of this paper would like to present the subject and propose the spatial and functional solutions for the adaptation of a 19<sup>th</sup> century historical palace to fulfil this kind of functions on the basis of the social welfare home in Krzesimów.

## 1.2. Historical outline of Krzesimów

This area was entered into the register of monuments „as the example of the spatial layout from the 19<sup>th</sup> century on the basis of the original complex, of well preserved composition and stand, of historical, esthetical, natural and ecological value.” [6]. The palace-park complex in Krzesimów comprising the historical ponds is situated on the hill bordering from the west with a river. The first records of Krzesimów date back to 1409. Well-preserved 19<sup>th</sup> century palace was erected by the former owners of the lands, the Stamirowski family. The palace is two-storey, brick building in the classicist style (Fig. 1). The complex consists of an annex (which was built in the first half of the 19<sup>th</sup> century just like the palace) and such buildings as labourer quarters, two barns, a garner and a hops drying room.



Fig. 1. The front façade of the palace in Krzesimów (Photo: the author)

Over the time, the palace in Krzesimów was adapted many times to new functions, but it has never undergone the complete overhaul. Characteristic elements of historical park complex have been gradually worn-away (e.g. the fish pond on the western side of the palace which was closed). Just like most historical buildings in Poland, the complex in Krzesimów was exposed to the destroying effects of the war. At the end of World War II, a central work camp was created in Krzesimów. The prisoners were living in the old farm buildings and the palace was the headquarters of one of the units of the Ministry for Public Security. Since 1970s, the classicist park complex with the buildings has been used by a social welfare home. In 1997 – 98, the annex building was renovated. The ground floor and attic were adapted to residential function [6].

## 2. The problems regarding the adaptation of the historical buildings

The problems regarding the adaptation of the historical buildings arise already at the stage of the selection of their function. It's most usually the owner who has the biggest impact on the decision how the building will be used. An architect is responsible only for adaptation of the building to serve this function in the most suitable manner. Properly performed adaptation should make good conditions to pursue the assumptions of the functional program while respecting the historical fabric of the building [7]. However, the experiences and lessons drawn from the observations of completed realisations concerning design of the historical buildings in Poland and abroad, shows that it might be really problematic to realise these two assumptions at the same time. In some cases, the need to preserve historical elements enforces the modification of the design, which might decrease its functional efficiency.

The main functional problem observed in the analyses of the buildings' adaptation for the purposes discussed hereby is alteration of its function to serve the needs of the people with reduced mobility. There is no univocal definition of the disabled person. There are different types of disability (motor disability, impaired hearing or eyesight, etc.). That is why for this kind of projects, it is assumed that the space shall be designed to meet all the requirements of the person moving in the wheelchair. Such aspects as for example the physical range of arms and legs, the difference of the seat height or manoeuvrability of the wheelchair are taken into consideration. Other important problem is to adapt all passages and access ways to provide unhindered mobility for wheelchair users in the building [8].

The historical buildings are unique in the domain of renovation because they have imposed individual requirements concerning their preservation; therefore, they can't be adapted freely to the requirements of the public buildings. The adaptation of a historical building to fulfil the new (current) purpose is very common but usually problematic issue. One of the difficulties during the phase of design that aims at preparation of the space to fulfil a new function is limited space. According to Assoc. Prof. Piotr Molski PhD. Eng., the design in this case covers such aspects as:

- *Modernisation of technical equipment;*
- *Change of used or damaged construction elements or whole construction parts of a building;*
- *Transformation of functional layout and division of the interiors;*
- *Implementation of a cubature in complexes and buildings partially preserved (para-historical implementations);*
- *Addition of a cubature and development elements (ahistorical implementations) [9].*

The functional layout of a historical building should decide on its functional capability [7]. However, most often it is completely opposite, which then impacts the aesthetics of the adapted building. The possibilities and range of modifications concerning adaptation depends above all on the characteristics of a building and its spatial scale. Indispensable building's technical conditions surveys of are also crucial in this case.

## 3. The former functional and spatial modifications in Krzesimów

Today, the functional layout of the palace in Krzesimów differs substantially from the original internal division. A common feature of the spatial organization of the grand architecture buildings from Renaissance to Classicism period was enfilade, i.e. a suite of rooms aligned with each other, where each door faces other door leading to an adjacent room. Such

connection system was used also in the discussed palace, but over the time and due to changing regulations concerning the social welfare homes, it was necessary to adapt the building to a new way of use and to introduce substantial modifications. The schemas below present preserved, original wall configuration marked with black colour and the secondary division of the rooms in the palace marked with hatching designed to improve the comfort of the residents of the building. (Fig. 2).

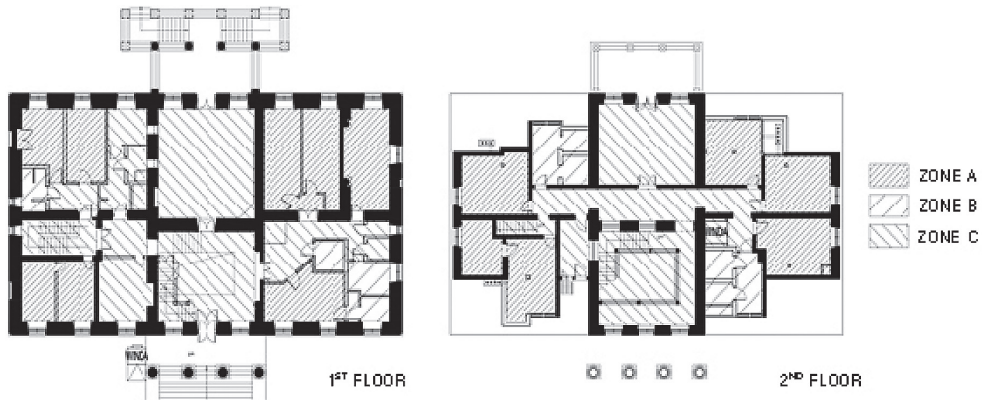


Fig. 2. The scheme of division into the functional zones (own elaboration)

Zone A (strefa A) shows accommodation spaces divided according to the conditions defined in the Regulations of the Minister for Labour and Social Policy on the social welfare homes [1] with special reference to minimum surface, which needs to be provided for a certain number of residents of a room. The building has single, double and triple bedrooms, whereas the adjacent annex has rooms for four persons. Zone B (strefa B) indicates sanitary facilities designed to meet the requirements of people with reduced mobility and wheelchairs users. Toilets are equipped with rails and handles, which facilitate e.g. moving between a wheelchair and a toilet or shower, or moving close to the sink. Separate shower cabins are equipped with shower seats for elderly people and those with reduced mobility. Zone C (strefa C) is the space comprising kitchen distribution room with utility elevator near the canteen, the duty office, the smoking room and the communication room. This zone might be defined as service space. Underground floors, the first and the second level of the basements are functionally also the part of the zone C. Despite the modest modification of the wall configuration, the need to fit kitchen, boiler house, laundry room and storage and technical facilities in the available space made it essential to do renovation works to make ventilation system in order to provide good sanitary conditions. The second floor was adapted mainly for the needs of the zone A. In order to get the required space for bedrooms, it was necessary to modify the configuration of the knee walls based on lightweight construction. The toilets on this floor are also equipped for the needs of the persons with disabilities. The first and second floors are connected with two staircases, which were constructed with the original palace, and with the modern elevator (Fig. 3). In order to improve living conditions, each bedroom was equipped with natural ventilation system (Fig. 4). Ventilation grills were connected with designed chimney with the use of elastic cables. Due to that, the additional elements have appeared on the façade of the palace. It was significant but necessary interference in the outside form of the building.



Within the frameworks of the adaptation of the building to the needs of a social welfare home, the minor changes were also introduced. Mechanical ventilation devices on underground floor were put in the kitchen and laundry windows and under the terrace from the side of the garden (Fig. 4). Another secondary element is the elevator beside the main entrance, which facilitates the mobility of the wheelchairs users (Fig. 4). The palace in Krzesimów, among the many other historical buildings, was one the examples of the situation where introduction of spatial and functional changes was inevitable to fulfil its designated function. The basic design problem, which had to be solved taking into consideration numerous factors and regulations, was to adapt historical elements to meet the requirements of the patients with various types and level of disability.



Fig. 3. The security features on the staircases and the space under the stairs to terrace from the side of the garden. (Photo: the author)



Fig. 4. The secondary solutions aimed at improvement of living conditions and functionality of the building. From left: the elevator beside the main entrance, mechanical installation under the terrace of the garden, ventilation grill inside the building. (Photo: the author)

## 4. Conclusions

### 4.1. The problems of the building

In March/April 2016, a technical condition survey of the palace of Krzesimów was conducted [10]. On the basis of this report, it is necessary to apply conclusions and indications

described in this chapter. The analysis takes into consideration the wide range of indications described and justified by the authors. It aims at improvement of the state of the building. By preparation of the plan of renovation, one should develop and anticipate the works to improve above all the condition of the foundations, the foundation walls and the roofing. Should the need arise to make thermal modernisation of the building (and if this need is supported with the calculations), it is necessary to use isolation materials inside the building keeping the historical architectural appearance of the space (mainly staircase and canteen). This solution will bring the expected results from the point of view of thermal efficiency, but it will affect adversely useful floor area of the rooms used by the residents. The Regulation of the Minister for Labour and Social Policy of 23<sup>rd</sup> August 2012 on social welfare homes defines required surface of the rooms and the way and extent they are equipped with furniture. Introduced changes and conducted construction works may contribute to the modification of functional parameters of the rooms, which might result in the situation where regulations currently in force won't be fulfilled. In case of all design and renovation works, it is necessary to thoroughly analyse and consider the conditions and decisions of Voivodship Conservator of Monuments and the applicable regulations on the designing of such facilities.

## 4.2. Proposed solutions

The Palace in Krzesimów currently hosts social welfare home, and that means that it was adapted to fulfil the needs of elderly people and people with various types and levels of disability according to the requirements included in the Regulation of the relevant Minister. However, on the basis of the conducted survey and on-the-spot inspection, we should underline that for the future renovation it is necessary to consider additional solutions facilitating the use and improving the comfort of residents already at the design stage. One of the most important thing that needs to be considered before start of the future investment is equipment of the residential rooms with mechanical ventilation and the canteen and dayroom with air conditioner. It should be designed in a way that has the least impact on the historical fabric. Other solutions, which need to be implemented, concern aesthetical and technological issues to a substantially lesser extent. It is worth mentioning that in the design process one should not take into consideration disability understood only as limited mobility, but also as impairment of other senses like sight and hearing. In order to adapt the building to the needs of people with various disabilities, it is necessary to choose special system of colours, illuminations, alarms and sound signals to improve the accessibility and quality of the use of the building both by the residents and by the caregivers.

## References

- [1] Dz.U. 2004 No. 64 item 593 (Polish Journal of Laws).
- [2] Szluz B. *Dom pomocy społecznej jako forma wsparcia nad osobami starszymi*, Elan Vital v Prie-store Medzigeneračných Vzťahov, Zborník príspevkov z konferencie s medzinárodnou účasťou 2010, 284-290.
- [3] Zych A. *Dom pomocy społecznej*. [w:] *Elementarne pojęcia pedagogiki społecznej i pracy socjalnej*, Eds.: Lalak D., Pilch. T. Warszawa: Żak, 1999, 61.
- [4] Niedbalski J. *Między kontrolą a autonomią – instytucjonalne uwarunkowania życia niepełnosprawnych intelektualnie mieszkańców domu pomocy społecznej*. w: *Niepełnosprawność – zagadnienia, problemy, rozwiązania*. Nr IV/2013(9), 47–64.

- [5] Tarkowska E. *Życie codzienne w domach opieki społecznej*, Warszawa, Wydawnictwo Instytutu Filozofii i Socjologii PAN, 1994, 135.
- [6] *Wytyczne konserwatorskie do planowanego remontu budynków i rewaloryzacji parku*. Krzesimów, gm. Mełgiew – the palace-park complex was entered to the register of monuments of Lublin Voivodeship under the no. A/740, on the basis of the decision of 15 September 1977, sign: KL.IV – 7/26/77.
- [7] Czyżniewska J. *Uwagi dotyczące problemów adaptacji obiektów zabytkowych do współczesnej funkcji*, [w:] *Adaptacja obiektów zabytkowych do współczesnej funkcji użytkowych*, Warszawa–Lublin 2009, wyd. Politechniki Lubelskiej, 19-28.
- [8] Budny J. *Dostosowanie budynków użyteczności publicznej – teoria i narzędzia*, Warszawa 2009, 6–10.
- [9] Molski P. *Adaptacja – formy i uwarunkowania* [w:] *Adaptacja obiektów zabytkowych do współczesnej funkcji użytkowych*, Warszawa–Lublin 2009, wyd. Politechniki Lubelskiej ISBN 978-83-7497-085-3, s. 87–98.
- [10] Trochonowicz M., Szostak B. *Ekspertyza dotycząca stanu technicznego pałacu i oficyny w Krzesimowie*, Fundacja Rozwoju Politechniki Lubelskiej, 2016.





# Theoretical and practical methodology for recognizing the road surface structure

**Stefan Firlej, Marcin Dębiński**

*Lublin University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture,  
Department of Roads and Bridges, Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: m.debinski@pollub.pl*

**Abstract:** A recognition indicator of the possibility of further use of the road during transferring transport loads are changes in the condition of the road surface. If the surface condition indicates incorrect parameters of its equality, rutting, or cracks, the road durability is qualitatively assessed. In this case, the actual load capacity rating and possible reconstruction of the structure begins. Values of dynamic deflections can be used to recognize the modulus of elasticity and thus the possibility of assessing the durability of a structure. The mechanistic method is used to dimensioning the structure due to the movement planned. It allows a flexible approach to further construction, giving the opportunity to assess whether part or all of it should be left or apply an additional layer to meet future requirements. The elastic modulus needed for this pavement structure design method for existing layers has been recognized by identification as backcalculation methodology that have been used for many years.

**Keywords:** road surface, backcalculation, dynamic deflections, road durability.

## 1. Introduction

In recent years, the road network in Poland has been significantly expanded. Many kilometers of roads have been created. The development of the car transport and the increase in the number of vehicles on Polish roads will result in the need for maintenance and repair. Appropriate recognition of the surface condition enables an adequate assessment of the structure and a decision as to the type of a repair method. In order to compare the practical and theoretical methods of a structure recognition, research and analysis were performed using two methods. The practical method chosen for the study is the Falling Weight Deflectometer (FWD) dynamic deflectometer test and the theoretical method – by means of backcalculation methodology [1–2].

## 2. Results

### 2.1. Backcalculation method

The analysis of the implementation of the backcalculation methodology as the surface identification was carried out for 2-, 3- and 4-layer systems. Calculations of the elastic deflections were made with the strictly theoretical method according to the theory of the cylindrical layout of the structure. The center of the wheel load of the computational car was adopted as its center. The model with 5 or more layers was omitted due to the solution being too long even in a computerized approach. These models were loaded with a car wheel with a diameter of

30 cm and a road pressure of 0.707 MPa. The lowest layer in this case is of infinite thickness. The numbering of the layers has been taken from the bottom to the top, in which the lowest is 1, and the highest number is related to the number of layers.

### 2.1.1. Two-layer model

The construction of the model is shown in the figure below.

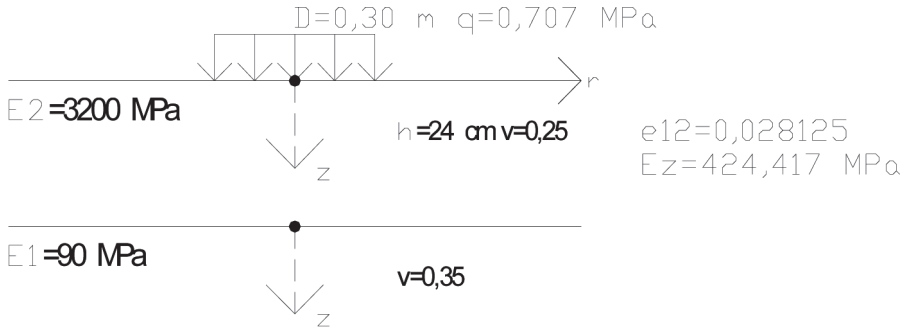


Fig. 1. 2-layer model

Fig. 1. 2-layer model

Computational vertical displacements of the road surface loaded from the center every 30 cm with an accuracy of  $10^{-3}$  micrometers.

Table 1. List of deflections of the 2-layer model

I	$r_i$ [cm]	$w$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	0	438.525
1	30	342.773
2	60	254.289
3	90	187.33
4	120	140.68
5	150	109.237
6	180	88.117

The backcalculation methodology is the determination of the modulus of elasticity of the model layers based on deflections and other parameters such as the layer thickness, load, and Poisson's coefficients. The method of determination in the normal case would be a longer, 2-layer, equal to 2 unknowns. To shorten the calculations, the methodology was changed from the 2 to 1 of the unknown. Instead of the modules, their quotient  $E_1/E_2$  was assumed in relation to the  $w_i/w_0$  deflection quotient. The successive changes of the  $E_1/E_2$  value and the calculation of the quotient of appropriate deflections for the changing model lead to the determination of the correct quotient of the modules. Using the back-calculating method, models for the basis point and subsequent points were calculated. The assumed deflection value with an accuracy of  $1 \mu\text{m}$  and  $0.001 \mu\text{m}$  indicates how different the elasticity modules

are. Leaving them gives the answer how exactly deflections should be measured using the FWD and Heavy Weight Deflectometer HWD [3–4].

Table 2. Identification results for an accuracy of  $1 \mu\text{m}$

i	w <sub>0</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	w <sub>i</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	E1 [MPa]	E2 [MPa]	Set of computational deflections for i, j [ $\mu\text{m}$ ]							
0–1	439	343	90.01	3189.9	439	343	254.36	187.327	140.652	109.209	88.096	
0–2	439	254	90.19	3178.24	439	342.746	254	289.966	140.337	108.952	87.89	
0–3	439	187	90.17	3179.35	439	342.77	254.034	187	140.367	108.996	87.909	
0–4	439	141	89.81	3202.78	439	343.279	254.756	187.726	141	109.493	883.23	
0–5	439	109	90.16	3180.44	439	342.794	254.068	187.034	140.397	109	87.929	
0–6	439	88	90.09	3184.48	439	342.882	254.192	187.159	140.506	109.089	88	
1–4	343	141	89.82	3213.04	438.468	343	254.642	187.694	141	109.506	88.327	

Table 3. Identification results for an accuracy of  $0,001 \mu\text{m}$

i-j	w <sub>i</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	w <sub>j</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	E1 [MP]	E2 [MPa]	Set of computational deflections for i, j [ $\mu\text{m}$ ]							
0–1	438.525	342.773	90.0001	3200.0058	438.525	342.773	254.289	287.33	140.679	109.237	88.117	
0–2	438.525	254.289	90.0001	3200.0049	438.525	342.773	254.289	287.33	140.679	109.237	88.117	
0–3	438.525	187.33	90	3200.0085	438.525	342.773	254.289	287.33	140.68	109.237	88.117	
0–4	438.525	140.68	89.9997	3200.0265	438.525	342.773	254.29	287.331	140.68	109.238	88.118	
0–5	438.525	109.237	90.0002	3199.9949	438.525	342.773	254.289	287.33	140.679	109.237	88.117	
0–6	438.525	88.117	90.0004	3199.9851	438.525	342.773	254.288	287.329	140.679	109.237	88.117	
1–2	342.773	90.0001	90.0001	3200.0034	438.525	342.773	254.289	287.33	140.679	109.237	88.117	

### 2.1.1. Three-layer model

The model data as in Fig. 2 was used for the analysis.

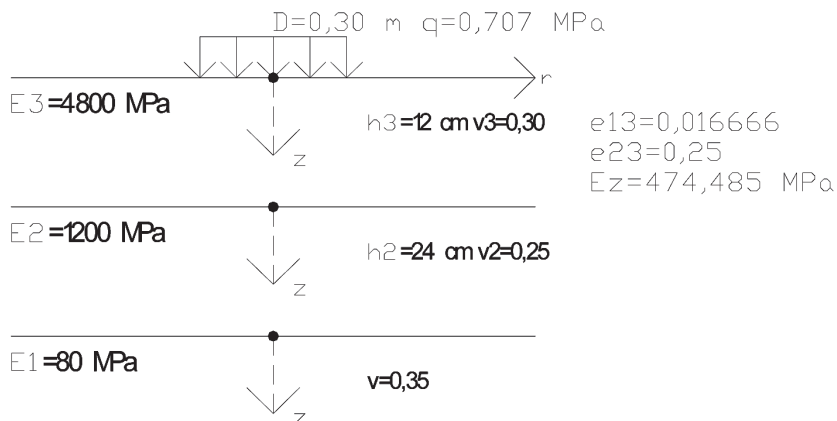


Fig. 2. 3-layer model

The method of the backcalculation of this model comes to establishing the ratio of  $w_i/w_o$  and  $w_j/w_o$  deflections quotients for the changing  $e_{13}$  and  $e_{23}$  quotients, so that the deflections of the searched and known model are consistent. The search function (1) and (2) is dependent respectively on (3) and (4). After determining the values of the  $e_{13}$  and  $e_{23}$  quotients, the values of the  $E_1$ ,  $E_2$ , and  $E_3$  modules are determined.

$$w_i/w_o = w_{i0} \quad (1)$$

$$w_j/w_o = w_{j0} \quad (2)$$

$$E_1/E_2 = e_{13} \quad (3)$$

$$E_2/E_3 = e_{23} \quad (4)$$

Table 4. List of deflections of the 3-layer model

I	ri [cm]	w [μm]
0	0	392.252
1	30	309.923
2	60	243.205
3	90	192.553
4	120	153.797
5	150	124.617
6	180	102.825

Table 5. Identification results for the model at the value of rounded deflections

I	j	k	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	Set of computational deflections for i, j, k [μm]						
0	1	2	80.09	1177.38	4951.79	392	310	243	192	153	124	103
0	1	3	79.77	1212.96	4790.74	392	310	244	193	154	125	103
0	1	4	79.88	1200.52	4846.02	392	310	243	193	154	125	103
0	1	5	79.78	1211.41	4797.61	392	310	244	193	154	125	103
0	1	6	79.87	1200.83	4844.66	392	310	243	193	154	125	103
0	2	3	80.13	1388.77	3799.67	392	307	243	193	154	125	103
0	2	4	80.07	1280.82	4321.78	392	309	243	193	154	125	103
0	2	5	80.11	1359.61	3928.77	392	308	243	193	154	125	103
0	2	6	80.08	1304.66	4195.68	392	308	243	193	154	125	103
0	3	4	97.52	1050.26	6186.66	392	313	244	193	154	125	103
0	3	5	97.71	1182.53	5009.53	392	311	244	193	154	125	103
0	3	6	79.52	1049.32	6178.17	392	313	244	193	154	125	103
0	4	5	82.18	522.37	930.83	392	281	235	191	154	125	103
0	4	6	82.13	5602.52	883.87	392	279	234	190	154	125	103



Table 6. Identification results for  $10^{-3}$   $\mu\text{m}$  bottom layers

I	j	k	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	Set of computational deflections for i, j, k [ $\mu\text{m}$ ]						
0	1	2	80	1200.06	4799.61	392.252	309.923	243.205	192.553	153.797	124.617	102.825
0	1	3	80	1200.06	4799.62	392.252	309.922	243.205	192.553	153.797	124.617	102.825
0	1	4	80	1200.05	4799.63	392.252	309.922	243.205	192.553	153.797	124.617	102.825
0	1	5	80	1200.05	4799.62	392.252	309.922	243.205	192.523	153.797	124.617	102.825
0	1	6	80	1200.01	4799.91	252	923	205	523	797	617	825
0	2	3	80	1200.01	4799.62	252	922	205	553	797	617	825
0	2	4	80	1199.97	4800.19	252	924	205	553	797	617	825
0	2	5	80	1199.99	4800.07	252	923	205	553	797	617	825
0	2	6	80	1199.95	4801.31	252	924	205	553	797	617	825
0	3	4	79.99	1199.73	4801.91	252	925	206	553	797	617	825
0	3	5	80	1199.82	4801.23	252	926	206	553	797	617	825
0	3	6	80	1199.25	4805.29	252	936	208	553	797	617	825
0	4	5	80	1199.97	4800.18	252	924	205	553	797	617	825
0	4	6	80	1199.97	4800.19	252	924	205	553	797	617	825
0	5	6	80	1199.97	4800.19	252	924	205	553	797	617	825

### 2.1.2. Four-layer model

The analysis of the model was carried out for the data shown in Fig. 3.

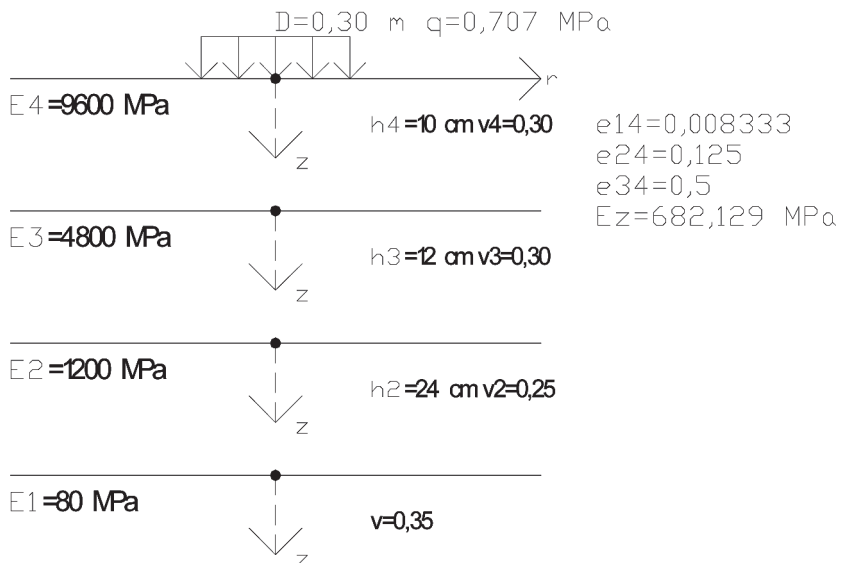


Fig. 3. 4-layer model

Table 7. Deflections in the 4-layer model

$I$	$r_i$ [cm]	$w$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	0	272.848
1	30	233.536
2	60	198.366
3	90	168.342
4	120	142.713
5	150	121.255
6	180	103.563

Identification of the 4-layer model on the basis of deflections calculated was carried out similarly to the previous one. The (5),(6),(7) modulus quotients were successively changed for the remaining data to obtain for these theoretical models the deflections quotients. If the deflections quotients matched with the quotients of the corresponding known values from Table 7 the (8),(9),(10) function and the modulus quotients were obtained. The modulus of the searched model were obtained on the basis of the quotients of the modulus and the  $E_z$  replacement module. The list of identification (back-calculating) for deflections from below to  $1\mu\text{m}$  is given in Tab. 8

$$e_{14}=E_1/E_4 \quad (5)$$

$$e_{24}=E_2/E_4 \quad (6)$$

$$e_{34}=E_3/E_4 \quad (7)$$

$$w_i/w_o = w_{io} \quad (8)$$

$$w_j/w_o = w_{jo} \quad (9)$$

$$w_k/w_o = w_{ko} \quad (10)$$

Table 8. Identification results for an accuracy of  $1\mu\text{m}$ 

i	j	k	l	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	E4 [MPa]	Set of computational deflections for i, j, k, l [ $\mu\text{m}$ ]						
0	1	2	3	79.42	1117.92	3732.09	13350.38	273	234	198	168	142.572	121.321	103.794
0	1	2	4	78.83	1142.52	3386.73	14514.64	273	234	198	168.231	143	121.875	104.415
0	1	2	5	79.76	1106.19	3946.78	12692.9	273	234	198	167.868	142.326	121	103.437
0	1	2	6	79.22	1125.61	3612.64	13737.32	273	234	198	168.078	142.715	121.504	104
0	1	3	4	78.35	1156.66	2820.67	17148.8	273	234	197.605	168	143	122.069	104.742
0	1	3	5	79.89	1115.5	4203.94	11824.66	273	234	198.168	168	142.389	121	103.39
0	1	3	6	79.18	1122.6	3509.98	14169.13	273	234	197.913	168	142.665	121.483	104

i	j	k	l	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	E4 [MPa]	Set of computational deflections for i, j, k, l [ $\mu\text{m}$ ]						
0	1	4	5	80.98	1343.29	8860.74	5561.39	273	234	199.812	169.284	143	121	102.936
0	1	4	6	79.46	1155.25	4258.67	11398.27	273	234	198.502	168.524	143	121.631	104
0	1	5	6	78.41	1181.12	1804.14	24040.85	273	234	196.027	166.285	141.571	121	104
0	2	3	4	77.68	1108.69	1967.22	26224.36	273	235.706	198	168	143	122.175	104.966
0	2	4	6	79.81	1332.98	4706.59	8406.83	273	232.6	198	168.394	143	121.653	104
0	3	4	6	80.62	2088.05	7127.71	3595.28	273	227.999	196.471	168	143	121.722	104

Similarly, the backcalculation methodology was performed for some combinations of deflections, but with their accuracy up to  $0.001 \mu\text{m}$ . The identification results obtained are presented in Table 9. The values of the modules were given with an accuracy of  $0.01 \text{ MPa}$ , and deflections with an accuracy of  $0.001 \mu\text{m}$ .

Table 9. Identification results for an accuracy of  $0.001 \mu\text{m}$

i	j	k	l	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	E4 [MPa]	Set of computational deflections for i, j, k, l [ $\mu\text{m}$ ]						
0	1	2	3	80	1200	4801.63	9596.96	273	233.536	198.366	168.342	142.711	121.25	103.56
0	1	2	4	80	1200.02	4799.5	9601.11	273	233.536	198.366	168.343	142.713	121.252	103.562
0	1	2	5	80	1200.04	4797	9605.94	273	233.536	198.366	168.344	142.715	121.255	103.565
0	1	2	6	80	1200.02	4798.93	9602.21	273	233.536	198.356	168.343	142.713	121.253	103.563
0	1	3	4	80	1199.83	4795.64	9609.76	273	233.536	198.364	168.343	142.713	121.253	103.564
0	1	3	5	79.99	1199.73	4791.96	9617.61	273	233.536	198.363	168.343	142.714	121.253	103.566
0	1	3	6	80	1199.86	4796.65	9607.6	273	233.536	198.365	168.343	142.713	121.252	103.566
0	1	4	5	79.99	1199.38	4786.42	9630.54	273	233.536	198.36	168.34	142.713	121.252	103.567
0	1	4	6	80	1199.92	4797.52	9605.56	273	233.536	198.365	168.342	142.713	121.253	103.567
0	1	5	6	80	1201.03	4812.76	9569.53	273	233.536	198.375	168.351	142.718	121.253	103.567
0	2	3	4	79.99	1198.57	4787.36	9635.33	273	233.545	198.375	168.351	142.718	121.254	103.565
0	2	3	5	79.99	1198.02	4784.64	9650.16	273	233.548	198.375	168.351	142.714	121.254	103.567
0	2	3	6	80	1199.07	4793.65	9621.91	273	233.542	198.375	168.351	142.712	121.252	103.567
0	2	4	5	79.99	1197.05	4778.64	9671.73	273	233.554	198.375	168.341	142.712	121.252	103.568
0	2	4	6	80	1199.61	4796.62	9610.78	273	233.538	198.375	168.343	142.712	121.253	103.568
0	2	5	6	80.01	1203.5	4818.03	9531.37	273	233.516	198.366	168.348	142.718	121.253	103.568
0	3	4	5	79.98	1195.15	4772.3	9705.49	273	233.568	198.371	168.348	142.718	121.253	103.568
0	3	4	6	80	1200.59	4799.4	9594.48	273	233.531	198.363	168.348	142.718	121.253	103.568
0	3	5	6	80.02	1208.19	4828.01	9459.55	273	233.478	198.35	168.348	142.716	121.253	103.568
0	4	5	6	80.03	1218.89	4850.38	9299.92	273	233.391	198.313	168.329	142.716	121.253	103.568

Table 10. Identification results for a set of deflections for different accuracy

Accuracy	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	E4 [MPa]	Deflections received [ $\mu\text{m}$ ]						
$10^{-3} \mu\text{m}$	80	1200	4801.63	9596.96	272.85	233.536	198.37	168.34	142.71	121.25	103.56
$10^{-2} \mu\text{m}$	80.01	1199.77	4814.18	9574.79	272.85	233.54	198.37	168.34	142.7	121.24	103.55
$10^{-1} \mu\text{m}$	80.23	1206.5	5074.82	9065.12	272.8	233.5	198.4	168.3	142.57	121.07	103.35
$1 \mu\text{m}$	79.42	1117.92	3732.09	13350.4	273	234	198	168	142.57	121.32	103.79

## 2.2. Examples of identification on rebuilt roads

When assessing the bearing capacity of a road undergoing reconstruction, measurements with the use of the FWD are often carried out to determine the suitability of existing layers for the new structure. In this case, the identification analysis was carried out based on the recognition of the existing surface – what are the materials in the layers, and what are the thicknesses of the layers. Materials can be determined from archival data or from the small-sized boreholes. The layer thickness can also be determined by a georadar or other possible method. In the measurement itself, the unit pressure value under the plate, the diameter of the plate, and the temperature of the test are known [5–8].

### 2.2.1. Kraśnik – Janów Lubelski road DK-19 km 376+000,00 -377+200,00

The following deflections were converted to a pressure of 0.707 MPa, so that the average values for individual geophones can be determined from the measurement set in the section.

Table 11. List of average deflections from geophones on section 1–3

Section	Roadway	The average deflection under the geophone [ $\mu\text{m}$ ]						
		w0	w1	w2	w3	w4	w5	w6
from 376+000,00 to 376+325,00	Left	386.5	239.12	153.26	98.26	76.31	56.62	45.45
	Right	475.45	288.41	184.49	124.18	88.1	62.66	49.16
from 376+350,00 to 376+825,00	Left	408.28	245.26	160.06	110.7	79.72	58.3	45.7
	Right	444.61	279.67	185.38	123.1	89.28	62.82	48.25
from 376+850,00 to 377+200,00	Left	637.69	398.06	242.63	156.3	110.49	76.02	59.98
	Right	574.3	367.22	221.99	147.11	104.13	79.08	64.88

After converting the measurement temperature of 20 °C to 10 °C, the modules shown in Tab. 12 were received.

Table 12. Elastic modules of the surface

Section	Layer thickness [m]		Poisson's ratio			Layers' modules [MPa]		
	h3	h2	v3	v2	v1	E3	E2	E1
from 376+000,00 to 376+325,00	0.185	0.18	0.3	0.3	0.3	1525	116	60
from 376+350,00 to 376+825,00	0.07	0.17	0.3	0.3	0.3	6150	290	88
from 376+850,00 to 377+200,00	0.13	0.17	0.3	0.3	0.3	1730	390	50

Layers in this construction are:

- upper layer of the MMA surface with different composition
- middle layer – a road grit
- ground substrate made of the clay sand or clay

### 2.2.2. DK 82 Lublin Włodawa road in the Łęczna km 23+670,00-24+820,00

Table 13. The construction of the existing surface

Section	Layer thickness [m]			Poisson's ratio			
	h4	h3	h2	v4	v3	v2	v1
23+670,00	0.15		0.07	0.4	0.3	0.3	0.35
24+100,00	0.1	0.17	0.1	0.4	0.3	0.3	0.35
24+600,00	0.09	0.13	0.09	0.4	0.3	0.3	0.35
24+700,00	0.16	0.13	0.07	0.4	0.3	0.3	0.35
24+820,00	–	0.2	0.2	–	0.4	0.3	0.35

Table 14. Reliable deflections obtained from the FWD and the identification modules

Section	The average deflection under the geophone [ $\mu\text{m}$ ]							Layers' modules [MPa]			
	w0	w1	w2	w3	w4	w5	w6	E4	E3	E2	E1
23+670,00	626	390	230	142	96	69	54	1983	206	22	99
24+100,00	677	409	241	154	109	79	63	1593	465	33	139
24+600,00	654	383	226	146	103	76	61	841	804	78	142
24+700,00	571	360	227	148	104	74	61	720	884	32	106
24+820,00	346	281	198	144	101	76	57	–	2508	426	101



### 2.2.3. DW 815 Wisznice – Parczew – Lubartów provincial road km 27+525,00-37+225,00

Table 15. List of authoritative deflections on sections

Section	Roadway	The average deflection under the geophone [ $\mu\text{m}$ ]							Layers' modules [MPa]		
		w0	w1	w2	w3	w4	w5	w6	E3	E2	E1
from 27+525,00 to 30+450,00	Left	589.3	492	382.6	308	267	218	176	1987.12	302.83	63.19
	Right	610.2	489.8	375.3	308.9	246.7	170.7	131	1932.65	177.49	70.47
from 31+275,00 to 35+500,00	Left	730	594	515.7	397	310	224	180	1952.07	159.7	54.18
	Right	766.5	605.3	463	382	294	190	140.1	1757.84	105.35	59.98
from 35+850,00 to 36+450,00	Left	784	646	523.9	410	303	249	190	1255.36	107.52	50.16
	Right	759.3	623.4	493.2	402	329	248	202.6	1171.97	554.28	50.58
from 36+625,00 to 37+225,00	Left	524.9	459	366.1	298	255	218	169	3407.14	184.25	68.49
	Right	560	444.1	347.9	302	225	165	134.9	2188.6	151.06	79.55

Table 16. Technical data of the existing structure on sections

Section	Roadway	Layer thickness [m]			Poisson's ratio	
		h3	h2	v3	v2	v1
from 27+525,00 to 30+450,00	Left	0.194	0.212	0.35	0.3	0.3
	Right	0.194	0.212	0.35	0.2	0.3
from 31+275,00 to 35+500,00	Left	0.184	0.239	0.35	0.3	0.3
	Right	0.184	0.239	0.35	0.3	0.3
from 35+850,00 to 36+450,00	Left	0.22	0.11	0.35	0.3	0.3
	Right	0.22	0.11	0.35	0.3	0.3
from 36+625,00 to 37+225,00	Left	0.204	0.15	0.35	0.3	0.3
	Right	0.204	0.15	0.35	0.3	0.3

Note: the ground substrate is the clay sand or clay; geophones were spaced from the center of the load plate – 26.5, 45, 60, 82.5, 120, and 144 cm.

### 3. Conclusion

Analysis of the results obtained from the theoretical method and practical tests was performed. When comparing both methods and the results, the following conclusions were noted:

1. The most accurate results are always for the lowest layer for the 2, 3 and 4-layer models.
2. The closest to the correct set of modules is in the case of known deflections with an accuracy of  $10^{-3}\mu\text{m}$  and those with the smallest roundness.

3. The largest deviations in relation to the correct module are when a set of deflections with the extreme points from the set is used.
4. It is possible to recognize the structure model by omitting the zero point and taking further into account.
5. A set of more results for a homogeneous section gives better possibilities of identifying modules due to the equalization of discrepancies and possible incorrect readings.
6. To determine the modules with the method, it is best to take the average reliable values after rejecting the extreme values based on the Chauvenet criterion.
7. The modulus of elasticity will be most likely for readings from geophones the closest to the FWD loading board.

## References

- [1] Nagórski R. *Mechanika nawierzchni drogowych w zarysie*. PWN, Warszawa 2014.
- [2] Firlej S. *Wyznaczanie parametrów modelu nawierzchni drogowej z dynamicznych badań FWD*. Politechnika Lubelska 2015.
- [3] Bajak M., Firlej S. *Wykorzystanie metody ugięć do projektowania wzmocnień nawierzchni drogowych* Drogownictwo 1 (2018) 22.
- [4] Wozuk A., Firlej S. *Metoda uwzględniania wartości ugięć poza zakresem nomogramu przy projektowaniu nawierzchni*, Drogownictwo 10 (2013) 314–318.
- [5] Bajak M., Firlej S. *Wpływ rzeczywistego obciążenia na trwałość nawierzchni*. Magazyn Autostrady 7 (2010) 56–59.
- [6] Katalog Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych GDDKiA Warszawa 2013.
- [7] Chai G., Manoharan S., Golding A., Kelly G., Chowdhury S. *Evaluation of the Traffic Speed Deflectometer data using simplified deflection model*. 6<sup>th</sup> Transport Research Arena, April 18–21 2016.
- [8] Zofka A., Graczyk M., Rafa J., *Qualitative evaluation of stochastic factors affecting the traffic speed deflectometer results*. Transportation Research Board 94th Annual Meeting Washington DC 2015.



## Modyfikacja składu granulometrycznego i właściwości geotechnicznych gruntu niespoistego za pomocą dodatku pyłu

Agnieszka Lal

*Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,  
e-mail: a.lal@pollub.pl*

**Streszczenie:** Istotną, z praktycznego punktu widzenia, właściwością gruntów stosowanych jako materiał nasypowy lub zasypowy w budownictwie ziemnym jest zagęszczalność. Wskaźnik uziarnienia wykorzystywanych w tym celu piasków, pospółek lub żwirów charakteryzuje się stosunkowo niewielką wartością, zazwyczaj wahającą się w granicach 2,5–4,0, co pozwala na określenie ich jako trudno lub średnio zagęszczalnych. W pracy przedstawiono wyniki badań, jakie przeprowadzono w celu określenia wpływu modyfikacji składu granulometrycznego gruntu niespoistego – piasku średniego, za pomocą dodatku pyłu lessowego na zagęszczenie. Za grunt mało spoisty przyjęto pył lessowy pochodzący z terenu Lublina. Grunty te zajmują znaczną powierzchnię obszaru miasta, a ich częste występowanie w strefie przypowierzchniowej, czyni je łatwo dostępnymi. Badania wykonano na próbie piasku średniego o uziarnieniu naturalnym, która stanowiła próbę kontrolną oraz dwóch mieszaninach piasku średniego z pyłem lessowym, sporządzonych w stosunku objętościowym 1:1 i 2:1. Każdy z gruntów poddano analizie sitowej i areometrycznej. Uzyskano krzywe uziarnienia, a także określono procentową zawartość poszczególnych frakcji. Analiza wyników składu granulometrycznego pozwoliła na wyznaczenie wskaźnika różnoziarnistości, który dla piasku średniego wynosił 1,71 zaś dla mieszanin piasku z pyłem lessowym wzrósł do 21,8 (w przypadku próbki materiałów zmieszanych w stosunku 1:1) oraz 13,3 (dla próbki materiałów zmieszanych w stosunku 2:1). Uzyskane wyniki sugerują, iż modyfikacja piasku średniego pyłem lessowym pozwala na zmianę klasyfikacji wytworzonej mieszaniny z gruntu trudno zagęszczalnego na dobrze zagęszczalny, a zatem możliwe jest uzyskanie większego zagęszczenia. W celu potwierdzenia tej tezy wykonano badania zagęszczenia i wilgotności optymalnej w aparacie Proctora wg metody I, dla każdego z trzech badanych gruntów. W przypadku próby kontrolnej maksymalna uzyskana gęstość objętościowa szkieletu gruntowego wynosiła 1,751 g/cm<sup>3</sup> przy wilgotności 11,96%. Próbki piasku łączonego z pyłem lessowym w stosunku objętościowym 1:1 oraz 2:1 wykazały maksymalne gęstości objętościowe odpowiednio 2,076 i 2,079 g/cm<sup>3</sup> przy wilgotności około 7%. W czasie badania stwierdzono plastyczność gruntu uzyskanego przez połączenie piasku i pyłu lessowego w stosunku objętościowym 1:1 przy wilgotności powyżej 14,25%, co wynika z faktu, iż piasek o takiej zawartości pyłu stanowi grunt na granicy gruntów spoistych i niespoistych. Zwiększona plastyczność uniemożliwia zagęszczenie badanego gruntu przy wilgotności powyżej 14,5% ze względu na powstające odkształcenia oraz wykazywaną spójność. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż modyfikacja uziarnienia piasku średniego pyłem lessowym w proporcji 2:1 pozwala na uzyskanie największego zagęszczenia w badanych warunkach. Wyniki badania sugerują, iż dzięki połączeniu piasku ze stosunkowo łatwo dostępnym pyłem lessowym można osiągnąć wymierne korzyści w postaci lepszego zagęszczenia gruntu, co pozwala na jego zastosowanie w budownictwie

ziemnym jako grunt nasypowy lub zasypowy oraz na wykorzystanie gruntu rodzimego na terenach lessowych.

**Słowa kluczowe:** piasek, less, uziarnienie, zagęszczalność, grunt nasypowy.

## 1. Wprowadzenie

W budownictwie ziemnym kontrolowane grunty nasypowe i zasypowe stanowią obok gruntów rodzimych główny materiał budowlany. Układane i zagęszczane warstwami, współtworzą budowle geotechniczne, od obwałowań rzek, przez ściany oporowe, podtorza ziemne i nasypy drogowe, aż po przyczółki mostów i estakad.

Dla tego typu obiektów oznaczenie stanów granicznych związanych ze statecznością zewnętrzną, wewnętrzną i ogólną jest niezbędne, w celu zapewnienia ich bezpiecznej eksploatacji. O ile stateczność wewnętrzna dotyczy elementów wzmacniających grunt (np. zbrojenia w postaci geosyntetyków, żelbetowych ścian kątowno-płytowych czy gwoździ gruntowych), stateczność zewnętrzna i ogólna zależy przede wszystkim od parametrów geotechnicznych gruntów. W praktyce inżynierskiej parametry te ustalane są najczęściej przy użyciu normy PN-81/B-03020 „Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie:” na podstawie znanego stopnia zagęszczenia (rodzimego) lub wskaźnika zagęszczenia (nasypowego) gruntu niespoistego. Grunty o większym zagęszczeniu charakteryzują się wyższymi parametrami geotechnicznymi [1], zatem w celu zwiększenia wytrzymałości oraz zmniejszenia odkształceń kontrolowanego gruntu nasypowego dąży się do jego jak najlepszego zagęszczenia.

Wpływ na uzyskane zagęszczenie ma zarówno dobór odpowiedniej metody zagęszczenia, jak i skład granulometryczny gruntu [2]. Do oceny możliwości zagęszczenia wykorzystuje się wskaźnik różnoziarnistości  $C_u$ , określany na podstawie krzywej uziarnienia jako stosunek wielkości średnic zastępczych  $d_{60}$  do  $d_{10}$ . Grunty uznaje się za dobrze zagęszczalne, gdy wskaźnik  $C_u$  jest większy od 5, średnio zagęszczalne przy  $C_u=3-5$  oraz trudno zagęszczalne przy  $C_u$  mniejszym od 3 [3]. W przypadku gruntów jednofrakcyjnych i równoziarnistych, których  $C_u$  waha się w granicach 2,5–4,0, osiągnięcie odpowiedniego zagęszczenia jest uciążliwe. Zarówno w przypadku pospółki jak i piasku średniego z domieszkami drobnego lub średniego żwiru, często stosowanego zarówno w budowlach geotechnicznych jak i do wymiany gruntów nienośnych, uzyskiwane zagęszczenie jest niezadowolające [4]. Badania potwierdzają, że wraz ze wzrostem udziału części organicznych w gruncie, zmniejsza się jego zagęszczalność [5]. W praktyce inżynierskiej ważne jest określenie optymalnego rodzaju gruntu nasypowego, charakteryzującego się dobrą zagęszczalnością.

Wśród stosowanych w budownictwie ziemnym gruntów dominują piaski, pospółki i żwiry, których badania wskazują na pojawiające się utrudnienia w zagęszczaniu. Związane jest to w dużej mierze z niewielkimi wartościami wskaźnika różnoziarnistości, co wynika ze stosunkowo dużej wielkości ziaren  $d_{10}$ . Modyfikacja składu granulometrycznego, zakładająca obniżenie średnic cząstek stanowiących wraz z mniejszymi 10% masy szkieletu gruntowego, pozwoli na uzyskanie większej wartości  $C_u$ , co powinno znaleźć odzwierciedlenie w uzyskanym zagęszczeniu. W celu oznaczenia rzeczywistego wpływu modyfikacji uziarnienia wybranego gruntu niespoistego na jego maksymalne zagęszczenie przeprowadzono badania laboratoryjne na trzech rodzajach materiałów, które stanowiły piasek średni oraz jego mieszaniny z pyłem lessowym, w zmiennych proporcjach. Określono wpływ modyfikacji składu wyjściowego gruntu piaszczystego pyłem lessowym na efektywność zagęszczenia, w celu oceny możliwości jego zastosowania jako gruntu nasypowego w robotach ziemnych i fundamentowych.



## 2. Metodyka badań laboratoryjnych

Badany grunt niespoisty stanowił piasek średni, pobrany na terenie Lublina, z głębokości około 1,5 m. Grunt ten łączono z pyłem lessowym pochodzącym z terenu Lublina, pobranym z głębokości około 1,0 m. W celu przeprowadzenia założonego eksperymentu przygotowano próbkę piasku średniego (MSa) o wadze około 10 kg oraz pyłu lessowego (Si), o wadze około 5 kg. Grunty wysuszono do stałej masy w suszarce w temperaturze 105°C, a następnie przeprowadzono rozdzielanie poszczególnych frakcji pyłu lessowego, który jako grunt spoisty wykazuje średnią wytrzymałość w stanie powietrzno-suchym. W kolejnym etapie grunty poddano kwartowaniu zgodnie z wytycznymi normy CEN ISO/TS 17892-4 [6]. Materiał gruntowy przygotowany w ten sposób posłużył do wydzielenia próbek na potrzeby założonych badań laboratoryjnych.

Badaniom poddano trzy rodzaje próbek gruntu – piasku średniego, piasku średniego łączonego z pyłem lessowym w proporcji objętościowej 1:1 (próbka siMSa (1:1)) oraz piasku średniego łączonego z pyłem lessowym w stosunku objętościowym 2:1 (próbka siMSa (2:1)).

Na podstawie analizy granulometrycznej, według wytycznych normy CEN ISO/TS 17892-4 [6], oznaczono procentową zawartości frakcji oraz wielkości wskaźników różnoziarnistości  $C_u$  i krzywizny uziarnienia  $C_c$ . Próbkę przygotowano zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w tabeli 1.

Tabela 1. Próbkę gruntów przygotowane do analizy sitowej

Lp.	Oznaczenie próbki	Masa MSa	Masa Si	Masa próbki $m_{st}$
1.	MSa	250 g	–	250 g
2.	siMSa (1;1)	127 g (85 cm <sup>3</sup> )	125 g (85 cm <sup>3</sup> )	252 g
3.	siMSa (2:1)	150 g (100cm <sup>3</sup> )	74 g (50cm <sup>3</sup> )	224 g

Przygotowane próbki gruntów przesiano kolejno przez zestaw sit o oczkach 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,125 oraz 0,063 mm na wstrząsarce mechanicznej. Czas przesiewu każdej próbki wynosił 10 minut. Po zakończeniu pracy wstrząsarki, każde z sit dodatkowo wstrząsano ręcznie przez około 1 minutę, celem dokładnego oddzielenia poszczególnych frakcji.

Po wykonaniu analiz sitowych, z próby drugiej oraz trzeciej do analizy areometrycznej frakcje pyłowo-iłowe wydzielono celem oznaczenia procentowej zawartości frakcji mniejszych od 0,063 mm. Analizę areometryczną oraz przygotowanie próbek przeprowadzono zgodnie z wytycznymi normy CEN ISO/TS 17892-4 [6]. Według zaleceń masa szkieletu gruntowego próbki wynosiła 24,00 g. Jako stabilizator do przygotowania zawiesiny zastosowano 25% roztwór amoniaku cz.d.a., łączony z wodą destylowaną w ilości 3 cm<sup>3</sup> na 1 dm<sup>3</sup> gotowego roztworu. Uzyskaną ciecz użyto do przemywania pyłu przez sito o oczku 0,063 mm. Przeprowadzono kontrolę stabilności uzyskanej zawiesiny po jej zagotowaniu i schłodzeniu do temperatury pokojowej. Stwierdzono brak występowania zjawiska koagulacji. Bezpośrednio przed przystąpieniem do analizy areometrycznej zawiesinę wymieszano stosując mieszadło, a następnie przewracając cylinder do góry dnem 30 razy w ciągu jednej minuty. Po upływie 30 sekund, 1,2 15, 30 minut oraz 1, 2, 4 i 24 h wykonywano odczyty z areometru zanurzanego w zawieszynie, dokonując również pomiaru temperatury zawiesiny. Przed rozpoczęciem analizy areometrycznej przeprowadzono cechowanie użytego do analiz areometru.

W kolejnym etapie badań wykonano analizę zagęszczalności gruntu w aparacie Proctora. Do badania przygotowano trzy rodzaje próbek (MSa, siMSa (1:1) oraz siMSa (2:1)). Skład wagowy próbek przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Próbkki użyte do badania w aparacie Proctora

Lp.	Oznaczenie próbki	MSa	Si	Masa próbki $m_{st}$
1.	MSa	3000 g	–	3000 g
2.	siMSa (1;1)	1793 g (1200 cm <sup>3</sup> )	1765 g (1200 cm <sup>3</sup> )	3558 g
3.	siMSa (2:1)	3586 g (2400 cm <sup>3</sup> )	1765 g (1200 cm <sup>3</sup> )	5351 g

Zgodnie z przyjętą (I) procedurą badania według wytycznych normy PN-EN 13286-2:2010 [7] masa próbek przekraczała 2000 g. Do badania zagęszczania gruntu użyto cylindra o średnicy 100 mm i objętości 1 dm<sup>3</sup> oraz ubijaka lekkiego (o wadze 2,5 kg), opuszczanego 25 razy z wysokości 305 mm w trzech fazach ubijania. Przed każdym zagęszczaniem powierzchnię gruntu w cylindrze wyrównywano. Gęstość oznaczano po całkowitym wypełnieniu cylindra zagęszczonym gruntem, a dla każdej z gęstości oznaczano wilgotność próbki, celem określenia wilgotności optymalnej. Wilgotność oznaczono jako procentową zawartość wody w masie szkieletu gruntowego, zgodnie z wytycznymi normy PN-86/B-02480 [8].

### 3. Wyniki badań

Analiza sitowa oraz areometryczna pozwoliły na określenie składu granulometrycznego trzech badanych rodzajów gruntu, piasku średniego MSa oraz piasku średniego zmieszanego z pyłem lessowym w stosunku objętościowym 1:1 oraz 2:1. Na podstawie masy gruntu pozostałego na sitach użytych do analizy granulometrycznej oraz wyników analizy areometrycznej sporządzono krzywe uziarnienia każdej z próbek (Fig. 2–4).

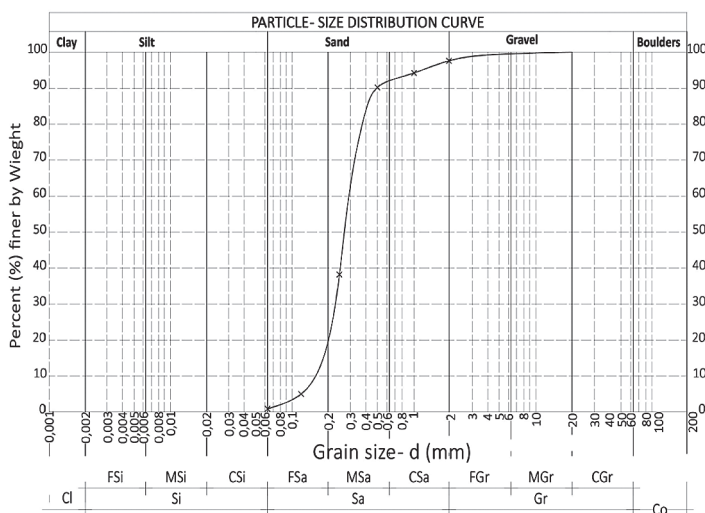


Fig. 1. Krzywa uziarnienia MSa

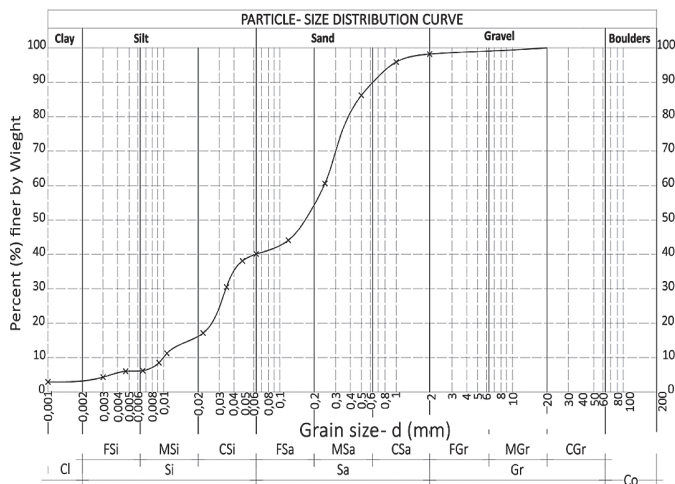


Fig. 2. Krzywa uziarnienia siMSa (1:1)

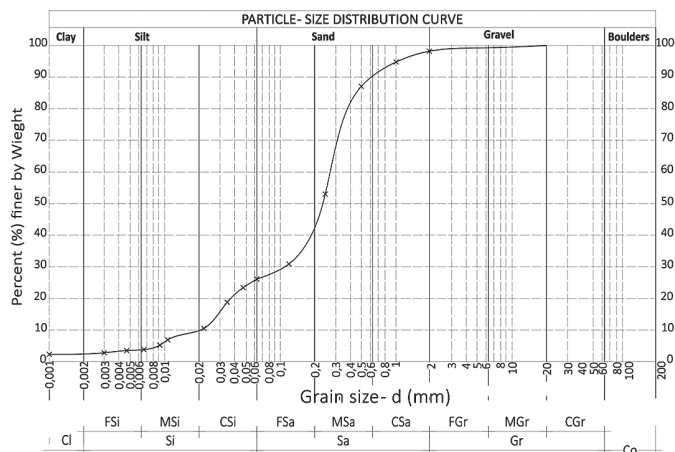


Fig. 3. Krzywa uziarnienia siMSa (2:1)

Na podstawie wykreślonych krzywych uziarnienia wyznaczono zawartości poszczególnych frakcji. Wyniki zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki badań składu granulometrycznego

Lp. Próbką	Udział frakcji [%]								
	4,0-2,0 (Gr)	2,0-0,63 (CSa)	0,63-0,2 (MSa)	0,2-0,063 (FSa)	0,063-0,001 (Cl, Si)	0,063-0,02 (CSi)	0,02-0,0063 (MSi)	0,0063-0,002 (FSi)	<0,002 (Cl)
1. MSa	2,4	5,5	72,5	18,7	0,9	—	—	—	—
2. siMSa (1:1)	1,8	8,2	35,7	14,2	40,1	24,0	10,0	2,9	3,2
3. siMSa (2:1)	1,8	7,8	48,1	16,2	26,1	16,3	6,1	1,3	2,4

Wyznaczone krzywe uziarnienia umożliwiły określenie charakterystycznych średnic ziaren każdej z próbek gruntu, które wraz z mniejszymi stanowiły odpowiednio 10, 60 i 30% masy szkieletu gruntowego. Następnie oznaczono wielkości wskaźnika różnoziarnistości  $C_u$  i wskaźnika krzywizny  $C_c$  badanych gruntów, a uzyskane wartości charakterystyczne każdej z próbek przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wartości wskaźników charakteryzujących uziarnienie badanych gruntów

Lp.	Próbka	$d_{10}$	$d_{60}$	$d_{30}$	$C_u$	$C_c$
1.	MSa	0,170	0,290	0,230	1,71	1,07
2.	siMSa (1:1)	0,011	0,240	0,033	21,8	0,41
3.	siMSa (2:1)	0,020	0,285	0,110	14,3	2,12

Badanie w aparacie Proctora pozwoliło na oznaczenie maksymalnego możliwego zagęszczenia każdej z próbek gruntu, a także wilgotności optymalnej, przy której zagęszczenie to jest osiągnięte. Wyniki badania zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki badania w aparacie Proctora

Lp.	Symbol próbki	Parametr	Nr badania							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1.	MSa	Gęstość [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,746	1,703	1,701	1,724	1,751	1,681	1,694	1,598
		Wilgotność [% wag.]	0,54	3,62	6,28	8,65	11,96	17,80	18,42	21,74
2.	siMSa (1:1)	Gęstość [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2,014	2,076	2,042	2,010	1,905	1,808	–	–
		Wilgotność [% wag.]	3,65	7,18	8,91	9,33	11,97	14,25	–	–
3.	siMSa (2:1)	Gęstość [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,968	2,002	2,032	2,057	2,079	2,067	2,028	–
		Wilgotność [% wag.]	2,68	3,15	4,35	5,24	6,83	7,60	9,41	–

Powyższe wyniki badań umożliwiły wyznaczenie krzywych zagęszczalności badanych gruntów (Fig. 4).

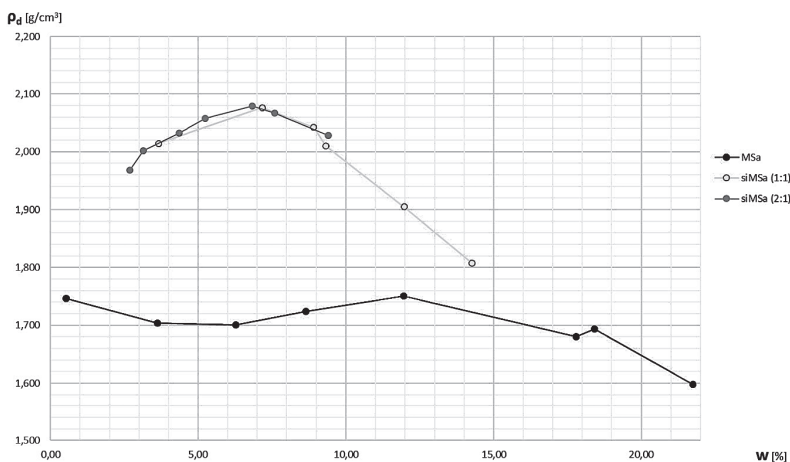


Fig. 4. Wykres zależności gęstości objętościowej od wilgotności

Należy podkreślić, że w przypadku gruntu siMSa (1:1) po zwiększeniu wilgotności powyżej 14,25% określenie parametrów zagęszczenia okazało się być niemożliwe, ze względu na plastyczność charakteryzującą badaną próbkę. Po trzech fazach ubijania w cylindrze pozostało odkształcenie powstałe na skutek uderzenia ubijaka, zaś część gruntu wykazywała połączenie z ubijakiem odpajając się od pozostałej w cylindrze części gruntu. Zwiększenie ilości faz ubijania okazało się bezskuteczne.

#### 4. Analiza wyników i wnioski

Wyniki badań laboratoryjnych poddane zostały analizie, mającej na celu określenie wpływu modyfikacji składu granulometrycznego piasku średniego pyłem lessowym na jego maksymalne zagęszczenie. Analiza składu granulometrycznego pozwoliła na sklasyfikowanie piasku jako średniego oraz pyłu lessowego jako pyłu grubego. Pył ten zawierał około 9% frakcji ilastej.

Obliczone na podstawie krzywych uziarnienia wskaźniki różnoziarnistości pozwalają na przyjęcie wniosku, iż gruntem najlepiej zagęszczalnym spośród badanych jest siMSa (1:1). Wskaźnik ten pozwala także na zakwalifikowanie piasku średniego MSa bez dodatku pyłu lessowego jako trudno zagęszczalnego, oraz piasku średniego łączonego z pyłem lessowym (w obydwóch przyjętych wariantach proporcji) jako dobrze zagęszczalnego. Zmiana wartości wskaźnika  $C_u$  wynika ze zmniejszenia średnicy ziaren, które wraz z mniejszymi stanowią 10% masy gruntu. W przypadku piasku średniego wielkość  $d_{10}$  wynosi 0,17 mm, natomiast po modyfikacji składu granulometrycznego pyłem lessowym maleje do 0,020 mm i 0,011 mm. Piasek średni z pyłem lessowym uznano wobec powyższego jako materiał o większej zdolności do zagęszczenia.

Analiza uzyskanych wartości wskaźnika krzywizny badanych prób w odniesieniu do wielkości ich wskaźników różnoziarnistości, pozwala na sklasyfikowanie próbki siMSa (1:1) jako gruntu o nieciągłym uziarnieniu, ze względu na wartość  $C_c$  równą 0,41 przy wysokiej wartości  $C_u$ . Próba kontrolna MSa osiąga wielkości wskaźników charakterystyczne dla gruntów jednofrakcyjnych ( $C_u < 6$ ,  $C_c \approx 1$ ), zaś próbka siMSa (2:1) wykazuje wartości odpowiadające gruntom wielofrakcyjnym ( $C_u \approx 15$ ,  $C_c = 2,12$ ).

Wyniki badania zagęszczalności w aparacie Proctora wskazują, że największym zagęszczeniem przy zastosowaniu tej samej procedury badania charakteryzuje się próbka piasku średniego zmieszanego z pyłem lessowym w stosunku objętościowym 2:1. Wyznaczona maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego dla próbki siMSa (2:1) wynosi 2,079 g/cm<sup>3</sup>, natomiast w przypadku piasku średniego bez dodatku pyłu lessowego uzyskano niższą maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego równą 1,751 g/cm<sup>3</sup>. Potwierdzono tezę, przyjętą na podstawie niskiego wskaźnika różnoziarnistości, iż piasek średni bez dodatku pyłu lessowego należy sklasyfikować jako grunt trudno zagęszczalny. Piasek średni z pyłem lessowym (1:1) osiąga zagęszczenie znacznie wyższe (wartości maksymalnej gęstości objętościowej wyższa o 120%) niż piasek średni bez dodatku pyłu lessowego. Ze względu na brak powtórzeń badania uzyskane różnice pomiędzy osiągniętym zagęszczeniem obu mieszanin piasku i pyłu uznano za mieszczące się w granicy błędu oraz przyjęto wstępny wniosek dotyczący niewielkich różnic pomiędzy ich zdolnością do zagęszczenia. W toku dalszych badań planowana jest jego weryfikacja. Wilgotność optymalna piasku średniego wynosi 12%, podczas gdy dla próbek piasku modyfikowanego pyłem lessowym wynosi około 7%.



Jednym z najczęściej stosowanych w charakterze gruntu nasypowego i zasypowego jest piasek średni. Szerokie zastosowanie tego materiału w budownictwie ziemnym wynika z jego dostępności oraz względów ekonomicznych. Wykonane badania wskazują jednak na możliwość uzyskania większego zagęszczenia tego gruntu dzięki dokonaniu modyfikacji jego składu granulometrycznego pyłem lessowym. W obszarach, w których pokrywy lessowe stanowią znaczny procent powierzchni, zwłaszcza w warstwach przypowierzchniowych, często stosowane są jako grunt zasypowy przy wykonawstwie posadowienia bezpośredniego budowli. Wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że zastosowanie pyłu lessowego poszerzyć można o zastosowanie go jako dodatku do piasku w celu uzyskania gruntu o większej zagęszczalności i wykorzystania do różnorodnych zadań w dziedzinie budownictwa ziemnego.

## Literatura

- [1] Jermolowicz P. *Problematyka zagęszczania i stabilizacji gruntów w budownictwie. Technologie i ich skuteczność. Zasady projektowania i wykonawstwa*. Materiały szkoleniowe. Opolska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa, 1–72, 2015.
- [2] Dąbska A., Pisarczyk S. *Wyznaczenie parametrów geotechnicznych stosowanych do określania jakości zagęszczenia nasypów z gruntów niespoistych*. Acta Sci. Pol. Architectura 15(3) (2016) 3–15.
- [3] Kraszewski C. *Zagęszczanie gruntów niespoistych i kontrola zagęszczenia w budownictwie drogowym* s. 1–6, 2017.
- [4] Tymosiak D., Sulewska M.J. *Badania parametrów zagęszczalności gruntów niespoistych metodą Proctora*. Acta Sci. Pol. Architectura 15(3) (2016) 43–54.
- [5] Reichert J.M., Mentges M.I., Rodrigues M.F., Cavalli J.P., Awe G.O., Mentges L.R. *Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture*. Catena 165 (2017) 345–357, 2017.
- [6] ISO 17892-4:2016, *Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 4: Determination of particle size distribution*. 2016.
- [7] PN-EN 13286-2:2010, *Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie – Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody – Zagęszczanie metodą Proctora*, 2010.
- [8] PN-86/B-02480, *Grнты budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*.

## Modification of the grain size distribution and geotechnical properties of the non-cohesive soil by the addition of the silt

Agnieszka Lal

*Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture,  
Lublin University of Technology, e-mail: a.lal@pollub.pl*

**Abstract:** Frequent issue in the practice of soil engineering is the fill soil compactibility. The uniformity coefficient  $C_u$  of the Sand, Sand-Gravel and Gravel, that are the most common fill soil, is relatively low and usually is in the range of 2.5 – 4.0. These values allow

to describe Sand, Sand-Gravel and Gravel as uniformly graded. The aim of the paper was to determine the impact of modification of the grain size distribution of the non-cohesive soil – Medium Sand (MSa) on its compactibility. The loess silt, sampled in the territory of the Lublin city was used to modified the Sand particle size distribution. Loess silt cover the considerable area of the Lublin, frequently in the surface zone. This ensures that loess silt could be reckoned as the easily accessible material. Laboratory tests were conducted on prepared samples of three kinds of soils – Medium Sand, Medium Sand combined with loess silt in the volume proportion of 1:1 and Medium Sand combined with loess silt in the volume proportion of 2:1. There were sieve and hydrometer analysis performed to quantify the percent finer by weight of grain size of prepared samples of the soils. As the result of grain size analysis particle size distribution curves were obtained. Estimated effective size  $D_{10}$  and  $D_{60}$  were used to determine the uniformity coefficient. The value of coefficient  $C_u$  for the Medium Sand was equal to 1.71 and it rose up to 21.8 (in case of Medium Sand combined with loess silt in the volume proportion of 1:1) and 13.3 (for the Medium Sand combined with loess silt in the volume proportion of 2:1). Obtained values suggest, that modification of Sand grain size distribution with use of loess silt allows to classify received probes as soils with high compactibility. In order to prove this thesis Proctor tests were conducted. There were the same three kinds of the soil tested according to procedure I. Results indicate that Medium Sand with natural grain size distribution reached the maximum dry density of  $1.751 \text{ g/cm}^3$  at the optimum water content of 11.96 %. The maximum dry density of Medium Sand combined with loess silt in the volume proportion of 2:1 and 1:1 reached accordingly  $2.079$  and  $2.076 \text{ g/cm}^3$  at the optimum water content of about 7%. During Proctor test, there were plasticity of Medium Sand combined with loess silt in the volume proportion of 1:1 remarked, for the samples of water content greater than 14.25%. Increased plasticity prevents compaction of the examined soil with humidity above 14.25%, due to the deformations and cohesion. As the results of conducted laboratory tests, there were ascertained that modification of the grain size distribution of Medium Sand with loess silt with volume proportion of 2:1 allows to reached the maximum compactibility. Therefore, combination of the Sand and relatively easily accessible loess could be used in soil engineering as the fill soil.

**Keywords:** sand, loess, grain-size distribution, compactibility, fill soil.



# Modelowanie przepływu dyspersji cementowej jako cieczy nieliniowo plastycznie lepkiej

Jerzy Szerafin<sup>1</sup>, Paweł Zaprawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska  
e-mail: j.szerafin@pollub.pl

<sup>2</sup> Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
e-mail: p.zaprawa@pollub.pl

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano rozwiązanie analityczne przepływu dyspersji cementowej w prostoliniowych przewodach cylindrycznych, jako cieczy nieliniowo plastycznie lepkiej na tle innych modeli reologicznych. Przeprowadzone obliczenia rozkładu ciśnienia tłocznego oraz zasięgu przepływu wskazują na konieczność uwzględniania oporów natury tarciowej w analizie przepływu mieszanki cementowej.

**Słowa kluczowe:** dyspersja cementowa, przepływ, modelowanie.

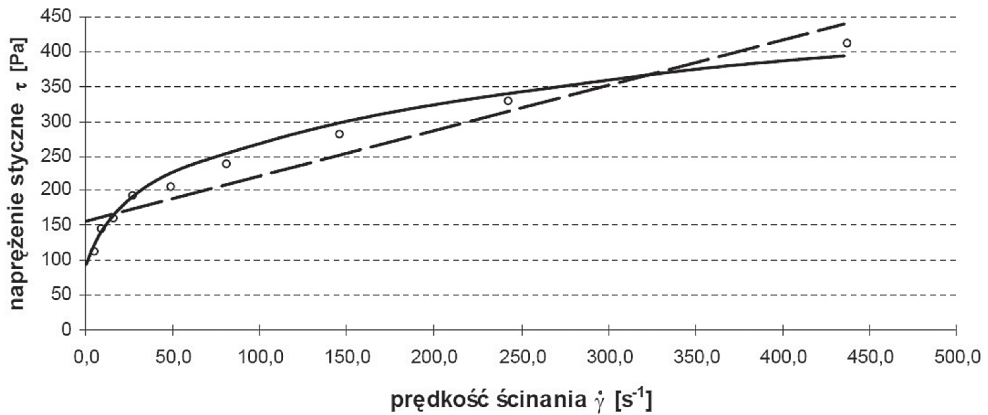
## 1. Wprowadzenie

Problematyka modelowania przepływu dyspersji cementowych ma istotne praktyczne znaczenie w wielu inżynierskich zastosowaniach, takich jak naprawy iniekcyjne elementów konstrukcyjnych, iniekcyjne wzmocnianie gruntów, czy wypełnianie kanałów w elementach kablobetonowych. Prace te należą do trudnych, między innymi ze względu na zasadniczy brak możliwości poprawienia źle przeprowadzonej próby. Dlatego prace te wymagają już na etapie ich projektowania dobrego rozeznania możliwych do osiągnięcia efektów. W tym celu od dawna podejmowane są próby ujęcia zagadnienia przepływu cieczy dyspersyjnej, zarówno analityczne (przykładowo: [1, 2]), jak i z wykorzystaniem metod numerycznych [3, 4]. Aktualnie zarówno jedne jak i drugie dalekie są jeszcze od doskonałości, jakkolwiek widoczny jest stały postęp w tej dziedzinie.

## 2. Modele reologiczne dyspersji cementowej

Podstawowym zagadnieniem w modelowaniu przepływu jest przyjęcie prawidłowego modelu reologicznego zaczynu cementowego, uwzględniającego jego dyspersyjny charakter. W skondensowanej zawieszynie poszczególne ziarna cementu oddziałują na siebie nawzajem w punktach styków, gdzie pojawiają się siły elektrostatyczne Coulomba oraz siły van der Waalsa o charakterze przyciągającym. Wskutek oddziaływań elektrostatycznych na powierzchniach ziaren cementu tworzy się tzw. elektryczna warstwa podwójna, odpowiedzialna z kolei za powstawanie sił o charakterze odpychającym. W wyniku interakcji tych oddziaływań, a także pojawiających się sił kapilarnych wytwarza się stan równowagi, przejawiający się powstaniem struktury o pewnej wytrzymałości, określanej jako granica ścinania (płynności)  $\tau_0$ . Po jej przekroczeniu dyspersja ulega odkształceniom postaciowym charakterystycznym dla płynów. Towarzyszą tym odkształceniom opory przepływu, których miarą jest lepkość plastyczna  $\eta_{pl}$ .

Charakter reologiczny zawiesiny cementowej jest złożony, i jak wskazują liczne wyniki badań – dość niejednoznaczny. Na podstawie obszernych danych dostępnych w literaturze, w tym w monografiach polskojęzycznych [5, 6] można przyjąć przedstawiony na Rys. 1 plastycznie lepki model przepływu z wyraźną nieliniowością, obserwowaną zwłaszcza w przypadku zaczynów o większych zawartościach fazy stałej. Granica płynności  $\tau_0$  odczytywana jest jako punkt przecięcia krzywej płynięcia z osią naprężeń, natomiast lepkość plastyczna jest tangensem kąta nachylenia prostej (lub odpowiednio: stycznej do krzywej w danym punkcie) do osi poziomej. Warto zauważyć, że wyznaczone w ten sposób parametry reologiczne mogą przyjmować różne wartości, w zależności od przyjętego modelu reologicznego.



Rys. 1. Charakter płynięcia zaczynu cementowego na przykładzie wyników badań własnych. Linia przerywana i ciągła oznacza odpowiednio: aproksymację liniową i nieliniową wyników badań

Model liniowy opisany jest równaniem reologicznym Bingham'a:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}, \quad (2.1)$$

zawierającym oba podstawowe parametry reologiczne. Ze względu na swoją prostotę oraz dobrą dokładność jest on chętnie przyjmowany do opisu przepływu zaczynów cementowych. Uwzględnienie nieliniowości krzywej płynięcia wymaga wprowadzenia dodatkowego parametru, opisującego zmienność lepkości przy wzroście prędkości ścinania. W niniejszej pracy przyjęto do dyskusji model wykładniczy, w postaci równania:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}^n. \quad (2.2)$$

### 3. Modelowanie oporów przepływu natury tarciowej

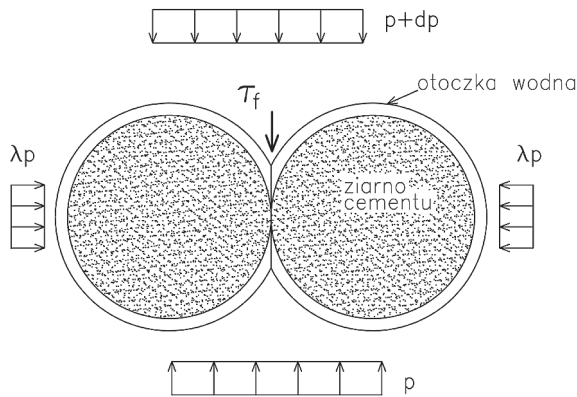
W przypadku cieczy niedispersyjnych, o oporach płynięcia stanowi (dla płynów nie-newtonowskich) granica ścinania  $\tau_0$  oraz lepkość  $\eta$ . Opis ten odzwierciedla występowanie oporów odpowiednio natury spójnościowej  $\tau_c$  i lepkościowej  $\tau_\eta$ . Autor pracy [7] zauważa, że ciecze dyspersyjne cechują się ponadto występowaniem oporów natury tarciowej  $\tau_s$ ,



występujących na stykach wzajemnie przemieszczających się względem siebie cząstek stałych. Sumaryczny opór ścinania można więc zapisać w postaci:

$$\tau = \tau_c + \tau_f + \tau_\eta \tag{3.1}$$

W zaczynie cementowym, na ziarnach cząstek stałych tworzy się warstewka zaadsorbowanej wody wykazującej właściwości sprężyste wskutek panującego w niej podwyższonego ciśnienia. Przyjęto w dalszych rozważaniach mechanizm powstawania oporów tarciovych w stykach ziaren cementu w otoczkach wodnych, spłaszczanych wskutek panującego ciśnienia tłoczego, jak to zilustrowano na Rys. 2.



Rys. 2. Mechanizm powstawania oporów tarciovych w mieszance cementowej

Zgodnie z analizą prowadzoną w [7], wielkość oporów tarciovych  $\tau_f$  zależy od wielkości powierzchni styków cząstek stałych w płaszczyźnie ścinania, wielkości naprężeń normalnych w tej płaszczyźnie oraz kąta tarcia wewnętrznego, według zależności

$$\tau_f = \sigma \cdot m \cdot \text{tg}\varphi, \tag{3.2}$$

w której  $\sigma$  jest naprężeniem normalnym w płaszczyźnie ścinania,  $\varphi$  jest kątem tarcia wewnętrznego,  $m$  – stosunkiem pola powierzchni styku ziaren do całej powierzchni ścicia. Zakładając, że naprężenia normalne w płaszczyźnie ścinania są proporcjonalne do wielkości ciśnienia osiowego  $p$ , ze współczynnikiem rozporu bocznego  $\lambda$ , można zapisać

$$\tau_f = \lambda \cdot p \cdot m \cdot \text{tg}\varphi. \tag{3.3}$$

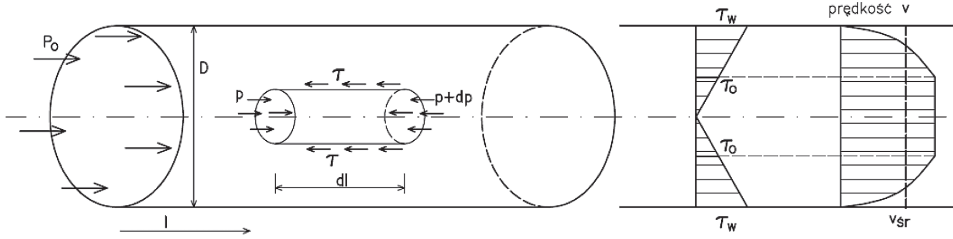
W dalszej części artykułu iloczyn parametrów opisujących stan struktury mieszanki zostanie zastąpiony stałą  $k$ , stąd

$$\tau_f = k \cdot p, \tag{3.4}$$

gdzie  $k = \lambda \cdot m \cdot \text{tg}\varphi$ .

#### 4. Przepływ w kanałach cylindrycznych

Rozkład naprężeń w przekroju kanału kołowego wyznacza się rozpatrując walcowy fragment cieczy w przewodzie tłocznym i ustalając warunki równowagi (Rys. 3)



Rys. 3. Schemat wyznaczania rozkładu naprężeń stycznych w kanale tłocznym o przekroju kołowym, rozkład naprężeń stycznych i profil prędkości

Punktem wyjścia do dalszych rozważań jest ogólne równanie przepływu w kanale o przekroju kołowym, pozwalające na znalezienie natężenia przepływu  $Q$

$$Q = \frac{\pi \cdot D^3}{8\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} f(\tau) \cdot \tau^2 d\tau, \quad (4.1)$$

gdzie  $\tau_w = -\frac{dp}{dl} \cdot \frac{D}{4}$ .

W powyższym równaniu postać zależności funkcyjnej  $f(\tau)$  uzależniona jest od przyjętego modelu reologicznego cieczy, pozostałe wielkości pokazano na Rys. 3. Rozwiązanie powyższego równania umożliwia określenie rozkładu ciśnienia tłocznego wzdłuż kanału, a w rezultacie takich istotnych wielkości jak np. zasięg tłoczenia  $L$ . W pracy [8] przedstawiono sposób przybliżonego rozwiązania równania przepływu dla modelu liniowego ciała plastycznie lepkiego (Binghama) oraz równania końcowe:

– model liniowy bez uwzględniania oporów tarcowych:

$$\text{ciśnienie wzdłuż kanału} \quad p(l) = P_0 - \frac{16(6\eta_{pl} \cdot v_{sr} + D \cdot \tau_0)}{3D^2} \cdot l \quad (4.2)$$

$$\text{zasięg tłoczenia} \quad L = \frac{3DP_0}{16\tau_0} \quad (4.3)$$

– model liniowy z uwzględnieniem oporów tarcowych:

ciśnienie wzdłuż kanału

$$p(l) = -\frac{1}{k} \left( \tau_0 + \frac{6\eta_{pl} \cdot v_{sr}}{D} \right) + \left( P_0 + \frac{1}{k} \left( \tau_0 + \frac{6\eta_{pl} \cdot v_{sr}}{D} \right) \right) \cdot e^{-\frac{16k}{3D}l} \quad (4.4)$$

$$\text{zasięg tłoczenia} \quad L = \frac{3D}{16k} \cdot \ln \left( \frac{P_0 \cdot k}{\tau_0} + 1 \right). \quad (4.5)$$

Powyższe wyniki przybliżone uzyskano przyjmując dodatkowe założenie, że wielkość  $\frac{\tau_1}{\tau_w}$  jest mała i w konsekwencji można ją zaniedbać.

W niniejszej pracy powyższe zależności zostały wyprowadzone dla bardziej ogólnego modelu nieliniowo plastycznie lepkiego z uwzględnieniem oporów tarcowych. Szczegółowe rozwiązanie zostało przedstawione poniżej

Równania konstytutywne są postaci:

$$\tau = \tau_1 + \eta_{pl} \left( \frac{dv}{dr} \right)^n, \quad \text{gdy } \tau > \tau_1, \quad (4.6)$$

$$\frac{dv}{dr} = 0, \quad \text{gdy } \tau \leq \tau_1. \quad (4.7)$$

gdzie w celu uproszczenia zapisów przyjęto  $\tau_1 = \tau_0 + \tau_f$ . Funkcja  $f(\tau)$  z równania (4.1) jest więc postaci:

$$f(\tau) = \begin{cases} \left( \frac{\tau - \tau_1}{\eta_{pl}} \right)^{\frac{1}{n}} & \tau > \tau_1 \\ 0 & \tau \leq \tau_1. \end{cases} \quad (4.8)$$

Po podstawieniu (4.8) do (4.1) natężenie przepływu jest dane wzorem:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^3}{8\eta_{pl}^{\frac{1}{n}} \cdot \tau_w^{\frac{3}{n}}} \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_w} \tau^2 (\tau - \tau_1)^{\frac{1}{n}} d\tau. \quad (4.9)$$

Klasyczne metody rachunku całkowego dają następujący wynik:

$$\int \tau^2 (\tau - \tau_1)^{\frac{1}{n}} d\tau = n(\tau - \tau_1)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{\tau_1^2 (\tau - \tau_1)}{n+1} + \frac{2\tau_1 (\tau - \tau_1)^2}{2n+1} + \frac{(\tau - \tau_1)^3}{3n+1} \right). \quad (4.6)$$

Uwzględniając te rachunki w (4.9) uzyskuje się zależność:

$$Q = \frac{n\pi D^3}{8(3n+1)\eta_{pl}^{\frac{1}{n}}} \sqrt[n]{\tau_w - \tau_1} \cdot B\left(\frac{\tau_1}{\tau_w}\right), \quad (4.10)$$

gdzie:

$$B(x) = 1 - \frac{1}{(2n+1)}x - \frac{2n}{(n+1)(2n+1)}x^2 - \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}x^3. \quad (4.11)$$

Przyjmując założenie, że wielkość  $\frac{\tau_1}{\tau_w}$  jest wielkością małą otrzymuje się w konsekwencji, że  $B \approx 1$ , a stąd przybliżoną wartość natężenia przepływu:

$$Q = \frac{n\pi D^3}{8(3n+1)\eta_{pl}^{\frac{1}{n}}} \sqrt[n]{\tau_w - \tau_1}. \quad (4.12)$$

Z równania ciągłości przepływu wynika, że  $Q = v_{sr} \frac{\pi D^2}{4}$ . Łącząc dwa powyższe wzory można otrzymać związek:

$$\sqrt[n]{\tau_w - \tau_1} = \frac{2(3n+1)v_{sr}\eta_{pl}^{\frac{1}{n}}}{nD}, \quad (4.13)$$

skąd, po uwzględnieniu wzorów na  $\tau_1$  i  $\tau_w$ , można uzyskać równanie

$$\frac{D}{4} \cdot \frac{dp}{dl} + kp = -A, \quad (4.14)$$

gdzie:  $A = \tau_0 + \frac{v_{sr}^n 2^n (3n+1)^n \eta_{pl}}{D^n n^n}$ .

Rozwiązaniem ogólnym otrzymanego równania różniczkowego z warunkiem początkowym  $p(0) = P_0$  jest funkcja

$$p(l) = -\frac{A}{k} + \left( P_0 + \frac{A}{k} \right) \cdot e^{-\frac{4k}{D} \cdot l} \quad (4.15)$$

Po uwzględnieniu warunku brzegowego  $p(L) = 0$  oraz  $v_{sr} = 0$  w chwili zastopowania przepływu obliczamy zasięg tłoczenia:

$$L = \frac{D}{4k} \cdot \ln \left( 1 + \frac{P_0 \cdot k}{\tau_0} \right). \quad (4.16)$$

W wyniku przyjęcia określonego modelu reologicznego uzyskuje się różne postacie równań przepływu, a co za tym idzie, pojawiają się różnice w przewidywanych wynikach procesu przepływu. Jak wynika z otrzymanych wzorów, zasięg przepływu  $L$  zależy tylko od jednego z podstawowych parametrów reologicznych, tj. od granicy ścinania  $\tau_0$ . Taka sytuacja ma miejsce w każdym z analizowanych przypadków, co potwierdza spostrzeżenia zawarte w pracy [9].

## 5. Dyskusja rozwiązania równania przepływu

W omówionych w poprzednich rozdziałach modelach, natężenie przepływu wyrażone jest w skomplikowany sposób, co nie pozwala na łatwe wyznaczenie ciśnienia tłoczenia dyspersji cementowej. Przyjmowano więc dodatkowe założenia upraszczające równania modelowe, dzięki czemu uzyskane zostały wyniki dotyczące samego ciśnienia (wzory (4.2), (4.4), (4.15)), jak i zasięgu tłoczenia (wzory (4.3), (4.5), (4.16)).

Warto jednak zauważyć, że z samego założenia upraszczającego równania modelowe można wyprowadzić pewne wnioski dotyczące ciśnienia i zasięgu tłoczenia zawiesiny cementowej.

Przyjęcie założenia, że wielkość  $\frac{\tau_1}{\tau_w}$  jest mała prowadzi do prostego równania różniczkowego. Kładąc  $\frac{\tau_1}{\tau_w} = \varepsilon$  oraz stosując wzory na  $\tau_1$  i  $\tau_w$  można otrzymać równanie

$$\frac{\varepsilon D}{4} \cdot \frac{dp}{dl} + kp = -\tau_0. \quad (5.1)$$

Łatwo zaobserwować, że równanie (5.1) ma podobny charakter jak równanie (4.14). Rozwiązaniem tego równania z warunkiem początkowym  $p(0) = P_0$  jest

$$p(l) = -\frac{\tau_0}{k} + \left( P_0 + \frac{\tau_0}{k} \right) \cdot e^{-\frac{4k}{\varepsilon D} \cdot l}. \quad (5.2)$$

Widać więc, że rozważanie przybliżeń dla konkretnych modeli przepływu dyspersji cementowej prowadzi do „uszczerbienia” funkcji będącej rozwiązaniem równania przepływu, tj. uwzględnienia innych parametrów występujących w modelu ( $v_{sr}$ ,  $\eta_{pl}$ ).

Ze wzoru (5.2) można uzyskać wielkość zasięgu tłoczenia. Mianowicie, z warunku  $p(L) = 0$  wynika, że

$$L = \frac{\varepsilon D}{4k} \cdot \ln \left( 1 + \frac{P_0 \cdot k}{\tau_0} \right). \tag{5.3}$$

Należy zaznaczyć, że wyniki uzyskane w tym rozdziale należy traktować jako bardzo zgrubne oszacowania, jednakże pokrywające się swą postacią z wynikami omawianymi w rozdziale 4.

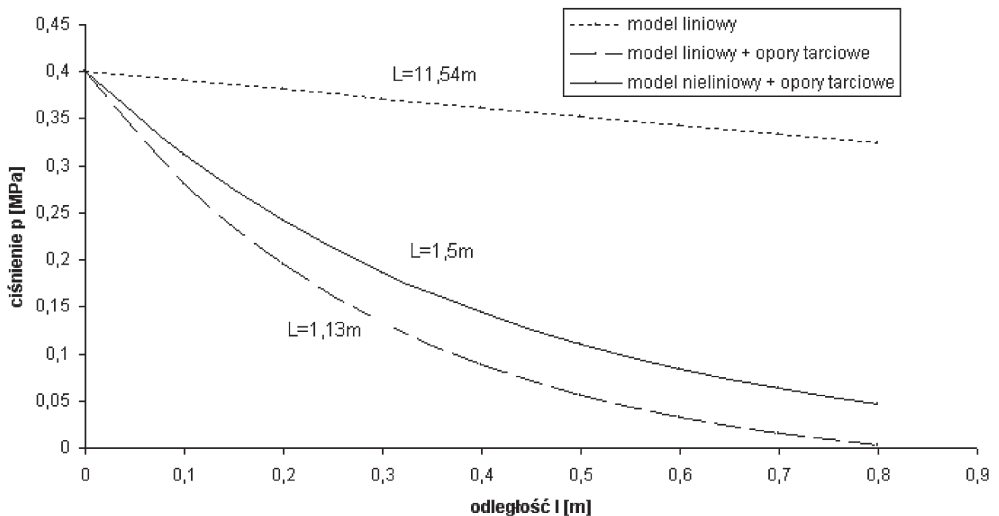
### 6. Analiza liczbowo równań przepływu

Porównanie wyników obliczeń uzyskanych na podstawie przedstawionych równań przepływu przeprowadzono przyjmując następujące wielkości:

- parametry technologiczne:  $P_0 = 0,4$  MPa,  $D = 2,0$  mm,  $v_{sr} = 0,05$  m/s;
- parametry reologiczne:  $\tau_0 = 13,0$  Pa,  $\eta_{pl} = 0,15$  Pa·s,  $n = 0,5$  MPa;
- parametry tarciove:  $\lambda = 0,94$ ,  $tg\varphi = 0,03$ ,  $m = 0,043$ .

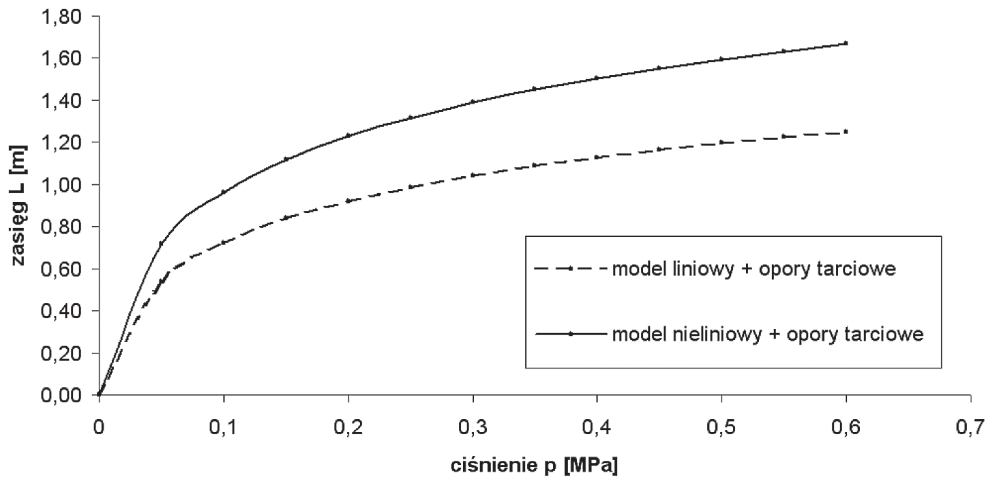
Poszczególne dane do obliczeń zostały określone na podstawie własnych badań doświadczalnych (parametry reologiczne) danych literaturowych (tarciove) oraz praktycznych zastosowań iniekcji ciśnieniowej (parametry technologiczne).

Zmiana ciśnienia tłocznego  $p$  na długości kanału  $l$  oraz zasięgu tłoczenia  $L$ , obliczone na podstawie trzech przedstawionych w rozdziale 4 równań przepływu, zostały przedstawione na Rys. 4.



Rys. 4. Porównanie wyników obliczeń zmian ciśnienia tłocznego  $p$  oraz zasięgu tłoczenia  $L$ , dla trzech modeli reologicznych

Niewzględnianie oporów tarciovych w klasycznym modelu Bingham'a skutkuje uzyskaniem nadmiernie dużych – w stosunku do obserwowanych w praktyce – wartości zasięgu tłoczenia. Bliższe rzeczywistości możliwościom dyspersji cementowych są wyniki obliczeń uzyskane na podstawie modeli, które uwzględniają tarciove opory przepływu. Występowanie mniejszych oporów przepływu przewiduje model nieliniowy, uwzględniający obserwowane w rzeczywistości zjawisko tzw. rozrzedzania ścinaniem, a więc zmniejszanie się wartości lepkości w trakcie płynięcia. Efekt ten ma kilka przyczyn: po pierwsze przy ścinaniu zachodzi efekt uwalniania się wody błonkowej, zwiększając ilość wody wolnej, po drugie następuje orientacja wzdłuż linii przepływu początkowo bezładnie ułożonych cząstek o wydłużonym kształcie. Mniejsze opory przepływu w przypadku modelu nieliniowego skutkują zwiększeniem o 1/3 zasięgu przepływu, co zilustrowano na Rys. 5.



Rys. 5. Wyniki obliczeń zasięgu tłoczenia  $L$  wg równań (4.5) i (4.16)

## 7. Podsumowanie

Klasyczny model ciała Bingham'a nie oddaje w sposób dokładny rzeczywistego zachowania się dyspersji cementowych, przewidując mało realne w praktyce długości przepływu. Posługiwanie się takim modelem reologicznym prowadziłoby do zbyt optymistycznych przewidywań i w konsekwencji różnorodnych błędów w praktycznych realizacjach. Modele dyspersji cementowej, uwzględniające składnik oporów tarciovych na stykach ziaren cząstek stałych, pełniej opisują zjawiska zachodzące w trakcie jej przepływu ciśnieniowego. Z kolei uwzględnienie nieliniowego charakteru płynięcia przedstawione w niniejszym artykule wiąże się z nieco bardziej skomplikowanymi przekształceniami, prowadzi jednak do uzyskania zbliżonych wyników jak w przypadku modelu liniowego. Powstające różnice są natury ilościowej i są ogólnie zgodne z przewidywaniami.

Otrzymane równania przepływu wiążą parametry reologiczne, geometryczne i technologiczne, pozwalając na rozpoznanie zależności pomiędzy nimi i bardziej świadome projektowanie procesu tłoczenia dyspersji cementowych.



## Literatura

- [1] Happel J. *Viscous flow in multiparticle systems: Slow motion of fluids relative to beds of spherical particles*. AIChE Journal 4. No 2 1958.
- [2] Osswald T., Hernandez-Ortiz J.P. *Polymer Processing. Modeling and Simulation*, Hanser Pub. Munich 2006.
- [3] Chen Z., Huan G., Ma Y. *Computational Methods for Multiphase Flow in porous Media*. SIAM. Philadelphia 2006.
- [4] Chin W.C. *Computational Rheology for Pipeline and Annular Flow*. Gulf Professional Publishing. Boston 2001.
- [5] Grzeszczyk S. *Reologia zawiesin cementowych*. PAN 1999.
- [6] Mierzwa J. *Właściwości reologiczne zaczynów cementowych stosowanych w wybranych procesach technologicznych budownictwa*. Monografia. Politechnika Krakowska 1988.
- [7] Szwabowski J. *Reologia mieszanek na spoiwach cementowych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 1999.
- [8] Szerafin J. *Dyspersje cementowe w procesie iniekcyjnej naprawy defektów struktury betonu*. Monografia. Politechnika Lubelska 2011.
- [9] Hansson P. *Filtration stability of cementitious injection grouts with low w/c-ratio*. Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. London 1996.

## Flow modeling of the cement dispersion as non-linear viscoplastic fluid

Jerzy Szerafin<sup>1</sup>, Paweł Zaprawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology,  
e-mail: j.szerafin@pollub.pl

<sup>2</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Lublin University of Technology,  
e-mail: p.zaprawa@pollub.pl

The analytical solution for pipeline and annular flow of the cement dispersion for non-linear viscoplastic model of the fluid, compared with another rheological models were presented in the paper. The calculations of the pressure gradient and injection range shows that it is necessary to take into account the friction factor in the theoretical analysis of the cement grout flow.

**Keywords:** cement dispersion, flow, modelling.



## **Dialogue of epochs in postmodern urban planning concepts of the late XX<sup>th</sup> and early XXI<sup>st</sup> centuries**

**Olena Remizova, Natalya Novak**

*Architecture Fundamentals Dept., Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture  
e-mail: remizova.e@gmail.com*

*Architecture Fundamentals Dept., Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture  
e-mail: nata-nova@mail.ru*

**Abstract:** The postmodern architecture of the last third of the XX century saw a steady tendency of appealing to classical heritage aimed at combining modern technologies and historical associations with classical architecture.

The work considers postmodern urban planning concepts of the late XX-the beginning of XXI centuries. Methods of interpreting the order system in the architecture of postmodernism are analyzed by comparing such theoretical concepts as R. Bofill's industrial classicism, the new urbanism of L. and R. Krier, the theory of the city by Aldo Rossi. Architects postmodernists searching for sense and architectural language began to address to the historical past, using signs and images of classical architecture. Leaders of postmodern movement, trying to return to architecture the «eternal values» lost by modernism, opened a way for new creative searches and transformation of the order system elements. Its representatives were attracted by the «double code» of the order architecture, which allowed to solve complex town-planning problems.

Postmodernism declared the idea of «architecture parlante». The notion of «postmodern classicism» disguised the compositional search for dialogue with any classical epoch - antiquity, renaissance, baroque, classicism itself. The order language of these epochs, possessing a tremendous potential of utterance, allowed the architect to create all the new meanings and texts. The article discusses the change of semantic meanings occurring in modern urbanism, the interpretation of order compositions, the notion of «order tradition» and the expansion of the semantics of the order system in historical and cultural context. The article shows that the theory of postmodernism actualized the notion of «order tradition» and expanded the semantics of the order system by its application in modern city planning concepts.

**Keywords:** urbanism of the XX century, architecture of postmodernism, order in architecture, R. Bofill, R. and L. Krier, A. Rossi.

### **1. Problematisation**

The central issues of professional polemics in urban planning in the last third of the XX century are the problems of development and preservation of urban environment.

The concept of perception of the European city as a complete organic structure is the cornerstone of modern urban thinking. Comprehension of evolution of historically shaped cities resulted in understanding contradictions between the aspiration to realize the concept of «the radiant city» of modernism and the desire to keep continuity of traditions and national identity of the specific city, valuable to its inhabitants.

The crisis of urban modernist programs contributed to postmodern ideological searches and the emergence of new urban programs based on the concepts of neohistoricism.

**Neohistoricism** clearly manifested itself in urban planning as a special way of thinking, aimed at combining historical and contemporary practices of experiencing reality. It is distinguished by complex compositional rethinking of historical prototypes, sending the consumer to reflect on previous eras. People's need to develop the culture and feel connected to their own roots forced architects to look for such a method of design, which would rely not on the abstract entities, but on a true history of culture. Thus, the creative activity of a postmodern architect is based on rethinking of historical heritage and his own experience of living through it, which he does not want to lose. The architect builds dialogical relationship between the modern object and the historical prototype. Thanks to this, the viewer has memories, associations with earlier seen or endured experience of communication with prior cultures or memorable places.

Huge impact on formation of historically oriented modern urban environment was exerted by concepts of the American architects – R. Venturi [1], C. Lynch [3], T. Smith, M. Graves, K. Roche, M. Safdie, M. Goldsmith, etc. also European – A. Rossi [4], R. Bofill [5], R. and L. Krier [6; 7], D. Stirling, M. Garai and J. I. Linazasoro, H. Hollein, P. Portoghesi, V. Glazychev [8] etc. We will consider only some of them.

## 2. Content of the study

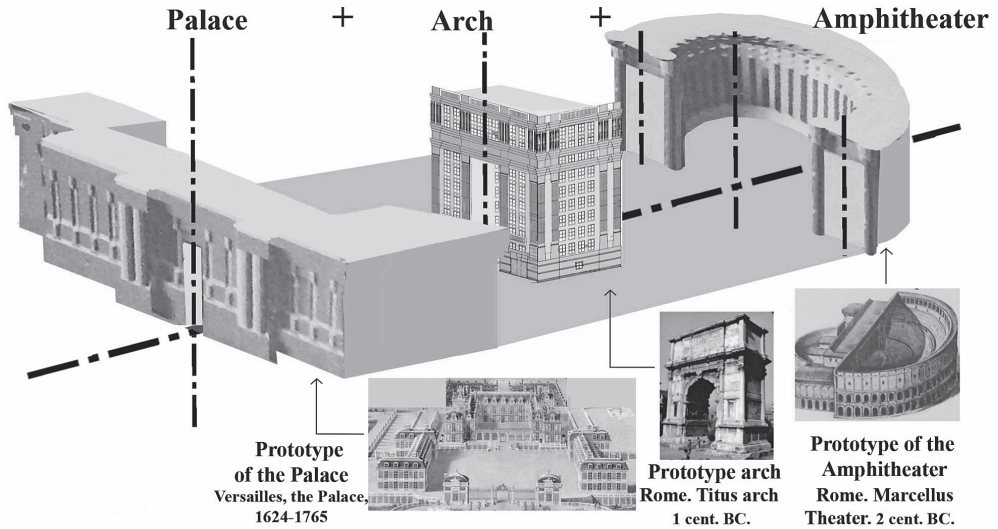
In their works, masters of postmodernism are polemic about the use and the development of **the classical order system** of different periods in their own modern practice.

The analysis of town-planning approaches of the last third of the XX century allows to distinguish original views of such architects as Ricardo Bofill, Rob and Leon Krier, Aldo Rossi, who are in polemics with orthodox modernism and enter into a dialogue with past eras.

For example, the Catalan architect R. Bofill states: «The principles of classical architecture ... never prevented true creators from expressing their individuality. Reckoning myself to them, I open polemic today. To be a classicist after modernism – it means inevitably to be a reactionary... Being inspired by the classics does not mean technological archaism, but, on the contrary, the novelty and connection of content and form, work on the architectural language and the search for conditions that give it the greatest strength» [5, p. 75].

In the urban ensembles of R. Bofill and his group Taller de Arquitectura, the order language is interpreted in the system of industrial housing construction. «If I'm risking today, it's only because I believe that I managed to develop my own system, tightly tied to memory and to history, which allows me to apply some of the modern achievements» [5, p. 99]. In the 80's and 90's, he developed the construction of the central area of Montpellier city, the master plan for the reconstruction of the Valencia city (the 1989 project, partially implemented), the reconstruction project of the southern part of Stockholm (1984–1989) and created projects of large-scale ensembles, including large residential complexes in Paris, Marne-la-Vallée, Saint-Quentin-en-Yvelines and others.

In these projects of town-planning ensembles, he interprets Renaissance ideas of an ideal city and a classic regular garden, which are reflected in the diverse landscape solutions of open spaces, green amphitheatres and exploited roofs. Continuing the classic tradition of creating open urban ensembles, Bofill emphasizes the continuity of traditions and points to the possibility of further development of this language.



Pic. 1. Morphological analysis of the Abraxas complex. The author's scheme

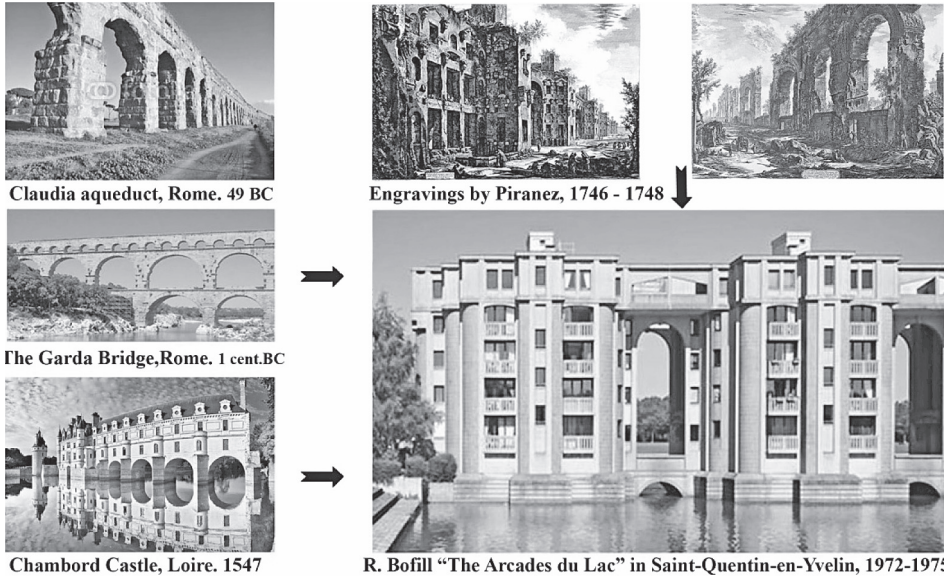
Borrowing the classic principles of compositional organization of spaces, to solve new modern town planning tasks in the conditions of industrialization, master refers to the order system as well. Historical references and quotations can be traced both in the general composition, and in separate details. The residential complex «Les Espaces d'Abraxas» in Marne-la-Vallée is a large housing estate that combined three structures: «Palacio», «Theater» and «Arch». The prototype was the classical typology such as the amphitheater, the triumphal arch and the palace. Residential sections outline the semicircular area associated with the traditional scheme of the ancient theater (pic. 1).

In the article «Architecture as a theater or the theater «of classical» architecture by Ricardo Bofill», dedicated to the residential complex of Abraxas, the author writes: «We undertake to assert that if Palladio first created the illusion of the city on stage, and Ledoux achieved unity of the stage space with the auditorium, Bofill created a precedent for the theatricalization of life itself» [9, p. 56]. Using the dialogue between a real city and its stage interpretation, the architect organizes the life of people, just as the director organizes the actors' play on the stage. People in the courtyard turn out to be actors, while the residents of the house watching them from the windows, appear to be spectators. Thus, «postmodernism, in its aspiration to develop its artistic language, refers to the idea of a dialogue with the historical past, which was born long before it, and uses for this purpose means of directing and dramatic art» [9, p. 61]. This is R. Bofill's favorite device: a semicircular building imitating a colonnade forms an area that is interpreted as a green amphitheater and public space. It varies in such projects as the Baroque Ladders in Paris, The Belvedere St. Christophe in Sergy-Pontoise, the «Golden Square» in Montpellier, the amphitheater in Calpe, the Port-Imperial in New Jersey, and others.

In the project «The Belvedere St. Christophe» in Sergy-Pontoise, (France, 1986), one can trace reminiscences for the projects of John Wood Jr. – The Royal Crescent and John Wood Senior – The Circus in Bath, England.

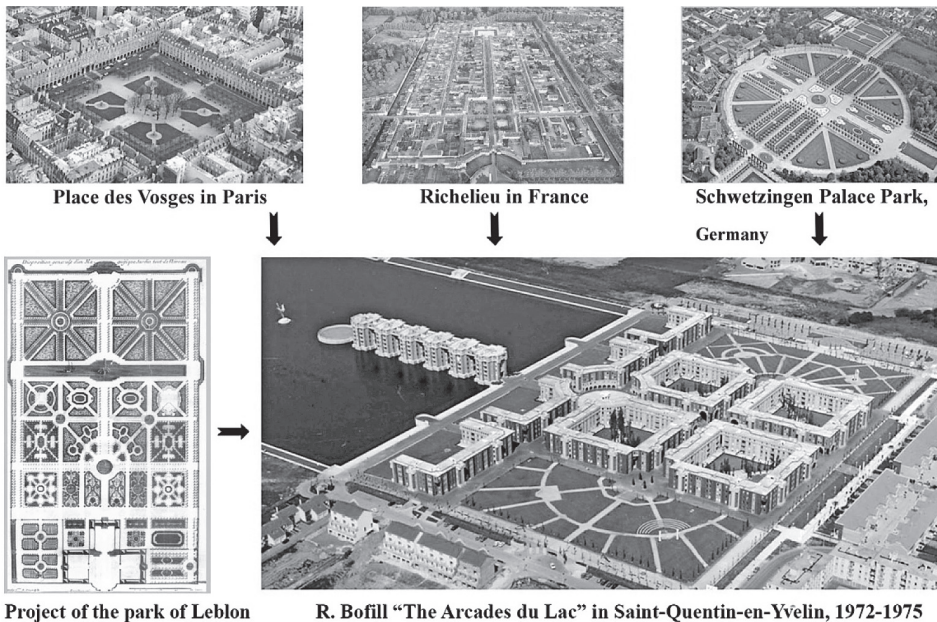
The composition of the «The Arcades du Lac» in Saint-Quentin-en-Yvelines» (1972–1975) demonstrates interpretations of the academic architecture of French classicism. The composition of the «Arcades du Lac» reminds the ancient Roman aqueducts (pic. 2).





Pic. 2. Analysis of prototypes of the «The Arcades du Lac» in Saint-Quentin-en-Yvelines. The author's scheme

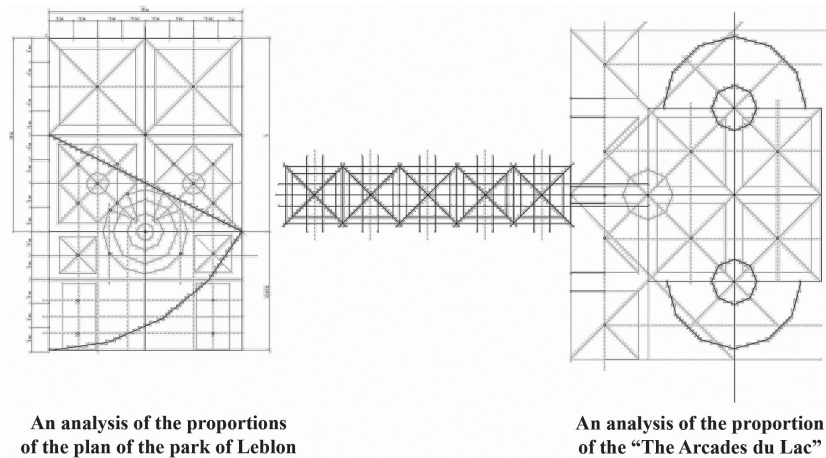
The architecture of postmodernism actualized the notion of sign and its meaning, semantics and syntax, the adoption of multiple coding, the citation of historical samples. History emerged as a catalog and a dictionary for searching historical associations, citations and references in the process of creating new architectural objects.



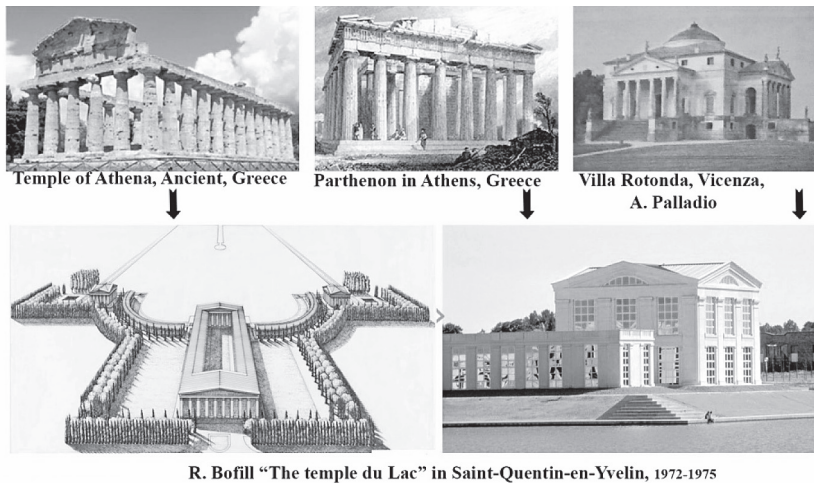
Pic. 3. Analysis of the prototypes of the planning structure “Arcades du Lac”. The author's scheme



Bofill uses the compositional logic of **dialogue with classicism** when he analyzes the structure of French regular parks. He develops the composite skeleton of the general plan by analogy with such ensembles as Versailles or Vaux-le-Vicente, where the stage space is notable for its visual appeal and representativeness (pic. 3, 4). During the Classicism era, French monarchs, repeating experience of Roman emperors, create suburban ideal garden cities. Such an ideal model was Versailles, which formed a new urban planning concept and «it is the Versailles principle of the planning scheme subordinating its original landscape that is attempted to transfer to the city» [10, p. 211].



Pic. 4. Comparative analysis of the proportions of “the Arcades du Lac” plan and of the Leblon park plan. The author’s scheme

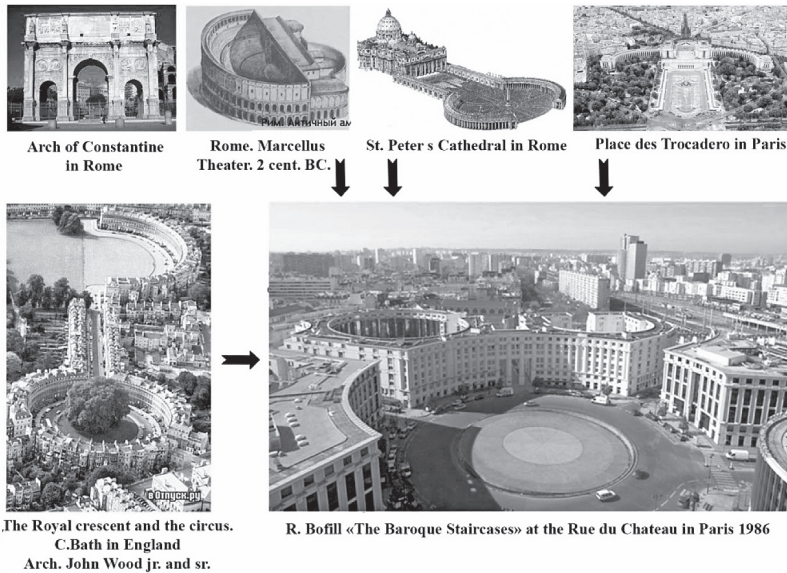


Pic. 5. Analysis of the prototypes of “the Temple du Lac”. The author’s scheme

The architect seems to say that the arsenal of such classical means of composition as symmetry, proportions and ornamentation is not outdated and can be developed (pic. 5). R. Bofill offers his interpretation of this style for modern social economic housing: «I wanted ... to

introduce the archetype of the temple into a “social” dwelling, to convert the welfare and solemnity of believers to the benefit of those who were rejected by our society» [5].

In «The Baroque Staircases» at the Rue du Chateau in Paris (1986), the master creates a composition from the intricately interconnected areas referring the viewer to the images of the ancient agora and forum, the Renaissance ideal city and the expressively dynamic Baroque square (pic. 6).



Pic. 6. Analysis of the «Baroque staircases» prototypes in Rue du Chateau in Paris. The author's scheme

In the project «Antigone» in Montpellier (1979–1984) a huge urban scale transforms the residential complex into a house-city, where a gigantic space is dissected by streets flowing into the square. Looking-forward straight streets, determined by the order regularities and the rhythm of different-scale columns, echo with the Renaissance city veduta and the Uffizzi street in Florence.

In these searches, Ricardo Bofill felt the possible path of further development of **the architecture language of postmodernism**. «He saw the metaphorical community of the ideas of Palladio and Piranesi, Boullée and Ledoux, the Russian avant-garde and the Stalin Empire style. The giant scale of the futuristic concept of French classicists and Russian avant-garde found their embodiment in the ensembles of modern residential complexes at the new aesthetic and compositional level» [9, p. 61]. To overcome the everyday life of residential areas and achieve grandeur R. Bofill uses expressive means of the order system; however, despite the similarity of artistic images, **the semantics of the order** is modified. In classicism, the order acted as a normative architectural and artistic system, in Bofill's works it is a living developing architectural language intended for creating a variety of architectonic compositions.

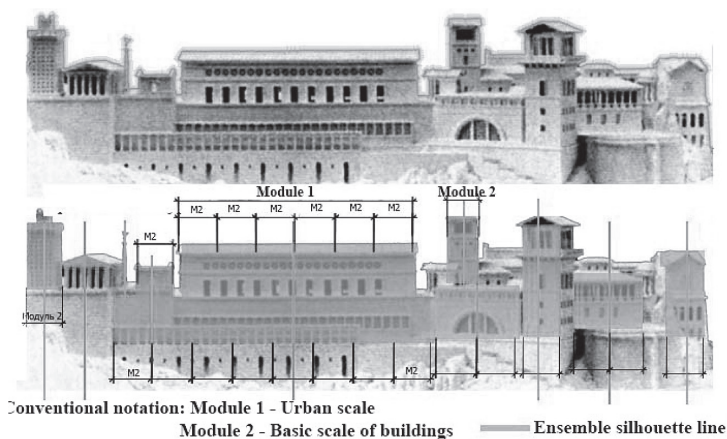
**Leon Krier**, the founder of the “new urbanism” movement, in 1978 published the Charter for the Reconstruction of European Cities, which radically changed the principles of the city's development in the period of postmodernism. He notes a number of problems of the modern historical city – irrational zoning, invasion of industrial images, and the loss of cultural and historical connection with the past. All these reasons lead to disruption of life processes.

Reflecting in his projects the theory of Camillo Sitte, Leon Krier preserves the structure of historical development and connects it with the new environment through a complex system of public spaces and buffer zones [6]. This can be traced in the project of reconstruction of the Luxembourg region of Echternach (1970), the general plan of the British city of Poundbury in the suburbs of Dorchester. The volume-spatial solution of Poundbury is associated both with the city-gardens of Henry Tessenov and with the historical centers of European cities. Addressing to historical images, L. Krier declares **the revival of classical tradition**. In the Poundbury project, he creates a stylized decoration of a traditional European city. Applying the typology of the pre-industrial city community at the end of the XXth century, the architect thereby affirms certain cultural state and model of social development.

The idea of «city in the city» affirmed the value of each fragment of urban fabric with all its constituent functions, morphology, traces of historical heritage and memory. Thus, the principle of free planning was contrasted with the classical quarter structure and its eclectic authenticity.

The language of architecture of brothers L. and R. Krier is at the same time simple and ambiguous, since it appeals to recognizable prototypes and to the complexity of modern life. This can be traced in a number of their projects for Luxembourg, Berlin IBA-87 and Vienna, in which the idea of «city in the city» was realized, based on **the reminiscences** of traditional classical German ensemble.

The reconstruction project of the ensemble of the ancient Roman villa in Laurentium (L. Krier, Pliny's Villa la Laurentine, Laurentum, 1982) combines classical images with elements of Mediterranean architecture. A complex three-dimensional solution consists of galleries, transitions, stylized narrow ornate streets and creates an image of the naturally formed complex structure of the ensemble. Using classical typology, L. Krier distinguishes a gallery, a building with a six-columned portico, imitating the antique temple as the main dominants of the ensemble. Continuing postmodern theme of playing with scales and contrasts, L. Krier in his project uses a variety of modular arrays. The analysis shows a number of different-scale elements ranged towards the increase: a small module of window openings perforations, the medium module is intercolumnar, a large module sets large scale to the main structures and volumes (pic. 7).



Pic. 7. Analysis of multi-scale modular systems in Villa la Laurentine, L. Krier, 1982. The author's scheme, based on a photo – [http://www.archiwebture.citedelarchitecture.fr/fonds/FRAPN02\\_LAURE#selection/-28.05.2018; 12:10](http://www.archiwebture.citedelarchitecture.fr/fonds/FRAPN02_LAURE#selection/-28.05.2018; 12:10)

In his project for Rotterdam, R. Krier uses images of the “cathedral for living” and “urban crown” [7, p. 93], giving to the modern city a baroque-romantic view (pic. 8).



Pic. 8. Rotterdam. Urban district Lloydpier. R. Krier, 2001. [7, p. 93]

The pluralism of European thinking actualizes attention to **the historical memory and collective memory of the city**, of which Aldo Rossi spoke. In the book, «L'Architettura Della Citta» the author claimed that all the cities remember their past, which is expressed through monuments of architecture. His ideological program is based on the concepts of «urban artifact» or «primary element» [4]. Investigating the past, he isolates the fundamental units – «timeless units» – as fundamentals of European city morphology, which make up the memory of cities in the form of architectural monuments.

This approach can be seen in such projects as the project of a residential complex Gallaratese (Milan, 1970–1979). Rossi's historicism in this project expresses the image of the traditional Milan apartment profitable building.

The concept of the San Cataldo memorial complex in Modena demonstrates its provisions on «architectural universals», and represents the reminiscences of the traditional Italian cemetery and a parallel with the projects of C.N. Ledoux and E.L. Boullée.

At reconstruction of the opera theater by Carlo Felice, Rossi demonstrated postmodern technique of blending historical appearance of the original project of 1826 by Carlo Barboron with refined modern order decisions.

In the project La Nuova Piazza in Perugia (1982) it is easy to read such traditional for the Italians signs of the temple as a portal and colonnade, but A. Rossi exaggerates them and combines with the elementary forms of modernism (pic. 9). Thus, he aroused the personal memories of each passer-by and created the situation of the dialogue of the present with the historical past.



Pic. 9. La Nuova Piazza in Perugia. A. Rossi, 1982. <http://www.arhinovosti.ru/2016/10/04/filosofiya-v-arkhitekture-aldo-rossi/> – 25.05.2018; 15:20



His ideas were supported by representatives of the Italian group La Tendenza – G. Grassi and V. Gregotti. Interpretation of the ideas of «primary elements» is reflected in the following works: the architect G. Grassi in the project of student dormitories in Chieti (1976–1989), architect V. Gregotti – in organizing the megastructure – the university complex in Palermo (Sicily, 1960–1985).

A. Rossi's conceptual program La Tendenza influenced the creation of the Spanish architectural school, which leaders are M. Garai and J. I. Linazasoro. Linazasoro makes a start from the ideas of the garden city realized in Hellerou's project. The ideas of a retrospective, a return to «primordial validity» was reflected in the project of the Ikastola school in the Basque Autonomous Community and in a residential building in Mendigora.

These examples show that the appeal to the historically folded fabric of urban space, the polemic about the semantic tasks of architecture and town planning in the works of postmodernist architects leads to the revival of the order language and to its various interpretations.

### 3. Conclusions

In different historical periods, the appeal to classical traditions provided an impetus to the development, to the solution of architectural problems and to the creation of new harmonious town-planning complexes and ensembles. In the same way, postmodern architects have proved the viability of this method, enriching modern urban projects with historical associations, complicated forms of dialogue with the environment. With their works, they opened a new period in the development of order logic and composition in the framework of the postmodern movement.

The most important achievement of the postmodern architecture that has influenced on the formation and development of urbanism is the contextuality of the city, namely, a design method that suggests compliance of a new object to the existing context; the revival of disappeared or destroyed fragments of urban fabric; the revival of the ensemble; creation of town-planning dominants and nodes, which form the visual framework of the city and serve as reference points in space; the desire to make the urban environment commensurate, clear and interesting for people.

### References

- [1] Venturi R. *Complexity and contradictions in architecture*. New York, 1966.
- [2] Jenks Ch. *The language of post-modern architecture*. Revised enlarged edition, 1977.
- [3] Lynch K. *The image of the city*. Cambridge, 1960.
- [4] Альдо Росси. Архитектура города (*Aldo Rossi. L'Architettura Della Citta*) – М.: Strelka Press, 2015.
- [5] Бофилль Рикардо. Пространства для жизни (*Ricardo Bofill. Espaseses D'Une Vie*). – М.: Стройиздат, 1993.
- [6] Krier L., Thadani D. *The architecture of community*. Washington: Island Press, 2009.
- [7] Krier R. *A romantic rationalist. Architect and urban planner*. Ursula Kleefisch-Jobst, Ingeborg Flagge (Hrsg. Eds.), Springer Wien NewYork, 228 p.
- [8] Глазычев В. Л. Социально-экологическая интерпретация городской среды. М.: Наука, 1984.
- [9] Ремизова Е. Архитектура как театр или театр «классической архитектуры» Рикардо Бофилла // Ватерпас, 2000, № 26–27, с. 54–61.
- [10] Глазычев В. Урбанистика. М.: Европа, 2008.





# **Influence of air humidity and temperature on thermal conductivity of wood-based materials**

**Maciej Trochonowicz, Monika Galas**

*Department of Conservation of Built Heritage, Civil Engineering and Architecture Faculty, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 40 Str., 20-618 Lublin, m.trochonowicz@pollub.pl*

**Abstract:** The aim of this paper is to approximate the issues related to the influence of air humidity and test temperature on the thermal conductivity coefficient  $\lambda$  of wood-based materials. During the laboratory tests, the  $\lambda$  coefficient was determined depending on the test temperature and air humidity, material density and sorption were also tested.

**Keywords:** wood-based materials, thermal conductivity coefficient, thermal insulation.

## **1. Introduction**

The paper aims to familiarize the research on thermal conductivity in wood-based materials. During the tests, the values of thermal conductivity coefficient were determined for various types of wood-based panels used in the construction industry.

During the laboratory tests, the thermal conductivity coefficient was determined depending on the test temperature and air humidity. The temperature-dependent coefficient was determined on 29 samples. 5 types of plates were selected for further research. Each type was tested in three temperature ranges. The next group of tests included the determination of the  $\lambda$  thermal conductivity coefficient for different air humidity of the sample tested. The test was done on samples at five different air humidity values. The tests were carried out on five types of fibreboards. On the basis of the results, the graphs were created on which the relationships between the  $\lambda$  coefficients, test temperature, air humidity, and material density are shown. The sorption curves have also been determined. The obtained test results are presented in the form of tables and graphs.

## **2. Test stand**

The tests were carried out using the Laser Comp FOX314 device, which consists of a base and a measuring chamber. The base includes a display with a keyboard to operate the device. The sample can be placed in the device after opening the door of the measuring chamber. The top plate of the instrument is fixed, the lower one has the ability to move up and down with the help of four stepper motors. After taking the sample through the plates, an average height value is read from four sensors with an accuracy of  $\pm 0.025$  mm.

To remove the radial temperature gradient in the plates, they were equipped with a heating and cooling system, which consist of groups of thermoelectric elements, monitored separately for each of the plates. When the coolant temperature is maintained at 18°C, the plates can reach independent temperatures in the range of 0°C to 95°C with an accuracy of  $\pm 0.02$ °C. [1]

To check the accuracy of measurements, the device was calibrated using a mineral wool sample numbered as S117, density equal to  $76.7 \text{ kg/m}^3$ , and dimensions of  $301 \text{ mm} \times 301 \text{ mm} \times 34.2 \text{ mm}$  (length  $\times$  width  $\times$  thickness). Due to the possibility of crushing the sample with automatic thickness measurement, the thickness was entered manually. A temperature range of  $10\text{--}30^\circ\text{C}$  was selected for the measurements, which corresponds to the range included in the instrument's manual. [2] The error of the calibration measurement was 0.22%, with a maximum permissible error of 2%, which means that the calibration of the device was carried out correctly.

### 3. Specimens tests

The plates collected were dried to a constant weight in an oven at  $70^\circ\text{C}$ . The determination of the thermal conductivity coefficient was carried out on 29 samples. The measurements were made using a stationary method in the Laser Comp FOX 314 device. The course of the study was controlled using the WinTherm32v3 software. Each of the samples was tested in one range, at a temperature of  $12.5^\circ\text{C}$  (lower plate temperature  $L=0^\circ\text{C}$ , upper  $U=25^\circ\text{C}$ ). The results obtained are presented in Table 1.

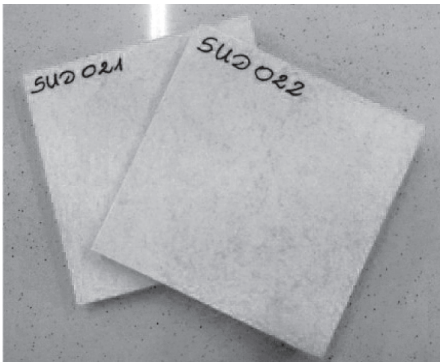


Fig. 1. Identification of the SUD 021 and SUD 022 samples. Thermo-insulating fibreboard –  $200 \text{ kg/m}^3$

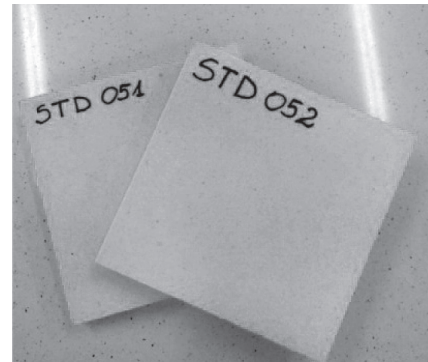


Fig. 2. Identification of the STD 051 and STD 052 samples. Insulating fibreboard –  $210 \text{ kg/m}^3$



Fig. 3. Identification of the SB 061 and SB 062 samples. Insulating fibreboard –  $240 \text{ kg/m}^3$

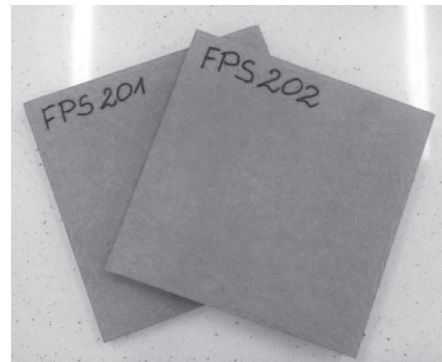


Fig. 4. Identification of the FPS 201 and FPS 202 samples. Porous fibreboard –  $290 \text{ kg/m}^3$

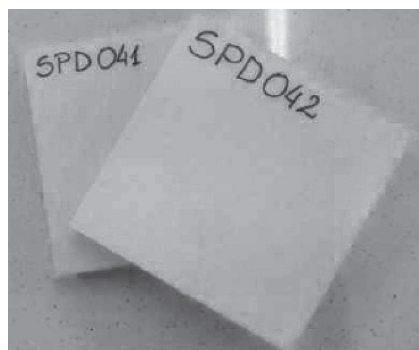


Fig. 5. Identification of the SPD 041 and SPD 042 samples. Insulating fibreboard – 160 kg/m<sup>3</sup>



Fig. 6. Identification of the OSB 1 sample – 560 kg/m<sup>3</sup>

Table 1. Results of the thermal conductivity coefficient of samples at 12.5°C

The designation of the sample	Type of material	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ average examined	Manufacturers's $\lambda$
			Temperature range		
			$U1=0; L1=25$	[W/mK]	[W/mK]
SP011	Insulating fibreboard	256	0.04751	0.048	0.050
SP012		257	0.04765		
SUD021	Thermo-insulating fibreboard	198	0.04392	0.044	0.045
SUD022		200	0.04410		
ST031	Insulating fibreboard	147	0.03800	0.038	0.038
ST032		147	0.03799		
SPD041	Insulating fibreboard	161	0.04151	0.041	0.043
SPD042		160	0.04141		
STD051	Thermo-insulating fibreboard	109	0.03772	0.038	0.037
STD052		108	0.03786		
SB061	Insulating fibreboard	240	0.04512	0.045	0.048
SB062		238	0.04484		
SU071	Thermo-insulating fibreboard	266	0.04691	0.047	0.048
SU072		266	0.04704		
SPH081	Insulating fibreboard	344	0.05344	0.053	0.050
FI091	Fibreboard	309	0.04504	0.045	0.05
FPT101	Hard fibreboard	905	0.07295	0.073	–
FPS201	Porous fibreboard	289	0.04815	0.048	0.05
FPS202		288	0.04813		
FW301	Porous fibreboard	290	0.04880	0.049	0.050
FW302		289	0.04870		
FT401	Fibreboard	168	0.03808	0.038	0.040
FT402		169	0.03808		
Chipboard 1	Chipboard	635	0.10220	0.102	–
Chipboard 2		590	0.09561	0.096	–
Chipboard 3		643	0.10130	0.101	–
OSB 1	OSB	561	0.08816	0.088	–
Plywood 1	Plywood	710	0.12730	0.127	–
Plywood 2		629	0.11640	0.116	–

After analyzing the results obtained for further research, five types of fibreboards with different densities were selected, two pieces from each density. Ten samples selected were dried at 70°C to a humidity of about 0%. The tests were carried out for three temperature levels: 22.5°C, 32.5°C, and 42.5°C.

Table 2. Temperature ranges used to the  $\lambda$  examination, using the Laser Comp FOX314 device

The temperature of the upper plate	The temperature of the lower plate	The temperature inside the sample
$U1=0^{\circ}\text{C}$	$L1=25^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{avg}}=12.5^{\circ}\text{C}$
$U2=10^{\circ}\text{C}$	$L2=35^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{avg}}=22.5^{\circ}\text{C}$
$U3=20^{\circ}\text{C}$	$L3=45^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{avg}}=32.5^{\circ}\text{C}$
$U4=30^{\circ}\text{C}$	$L4=55^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{avg}}=42.5^{\circ}\text{C}$

After each test, the samples were placed in the dryer so that the humidity was kept within 0% with each subsequent test. Below a table with results (Table 3) is placed, an exemplary graph with the relation of the  $\lambda$  coefficient and the test temperature (Fig. 7), a collective plot of the average values of the fibreboards tested (Fig. 8), and a bar graph of the average values of the  $\lambda$  coefficient.

Table 3. The values of the  $\lambda$  thermal conductivity coefficient depending on the test temperature

The designation of the sample	Producer's $\lambda$		$\lambda$ [W/mK]			
	[W/(mK)]	Temperature range				
		$U1=0; L1=25$	$U2=10; L2=35$	$U3=20; L3=45$	$U4=30; L4=55$	
SUD021	0.045	0.04392	0.04608	0.04591	0.04731	
SUD022		0.04410	0.04523	0.04661	0.04770	
STD051	(0.037)	0.03772	0.03901	0.04011	0.04090	
STD052		0.03786	0.0391	0.04011	0.04114	
SB061	0.048	0.04512	0.04647	0.04797	0.04857	
SB062		0.04484	0.04597	0.04700	0.04764	
FPS201	0.05	0.04815	0.04938	0.05040	0.05127	
FPS202		0.04813	0.04936	0.05040	0.05135	
FT401	0.040	0.03808	0.03925	0.04029	0.04115	
FT402		0.03808	0.03932	0.04032	0.04107	

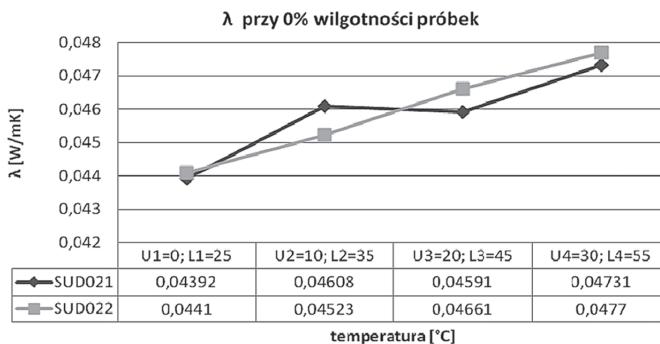


Fig. 7. The dependence of the  $\lambda$  thermal conductivity coefficient and the test temperature – the SUD02 material SUD02, samples 1 and 2

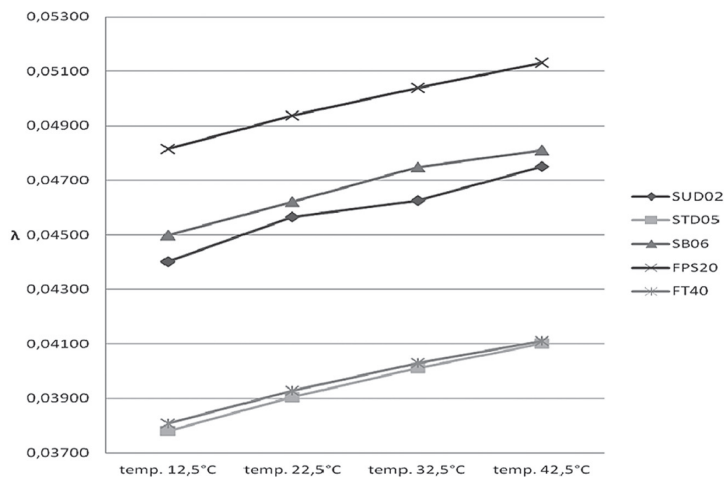


Fig. 8. A collective graph of the dependence between of the  $\lambda$  thermal conductivity coefficient and the temperature. Graph was developed for the average of two samples

In all studied wood-based panels, the diagrams show a course close to linear. To compare the influence of the test temperature on the thermal conductivity of selected materials, a graph of the percentage increase in the  $\lambda$  coefficient was made, assuming that the base value is the value of  $\lambda$  determined at an average temperature of 12.5°C. From the results obtained, it can be seen that for all materials, the percentage increase in  $\lambda$  was similar.

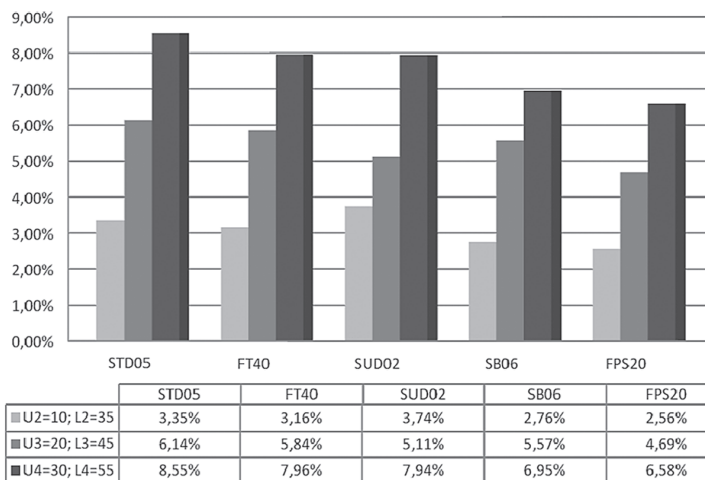


Fig. 9. The percentage increase in the  $\lambda$  thermal conductivity coefficient depending on the temperature range. The reference level is the value of the  $\lambda$  coefficient at a temperature of 12.5°C.

#### 4. Study of sorption properties

The purpose of the analysis was to investigate the amount of water that can be absorbed by the samples under the particular climatic conditions. For this test, the samples were dried to a constant mass, then placed in a climatic chamber in which the humidity was gradually raised

without changing the temperature (25°C). Initially, the lowest of the humidity selected for testing was set. Samples were weighed periodically until their weight was settled. The amount of water absorbed was determined at the moment when the sample mass stabilized. Correlation between air humidity and sorption humidity is shown by the sorption curves. A table with results (Table 4) and an example of a sorption curve chart are shown below (Fig. 10).

Table 4. The values of the equivalent sorption humidity of the materials tested in different air humidity

The designation of the sample	Air humidity				
	0%	32–33%	70–75%	80–85%	90–95%
	Sorption [%]				
SUD02	0.00	5.80	11.14	13.37	16.53
STD05	0.00	5.70	11.37	13.27	16.34
SB06	0.00	6.03	12.81	15.47	19.10
FPS20	0.00	5.42	10.75	14.02	17.32
FT40	0.00	5.70	12.20	15.73	19.64

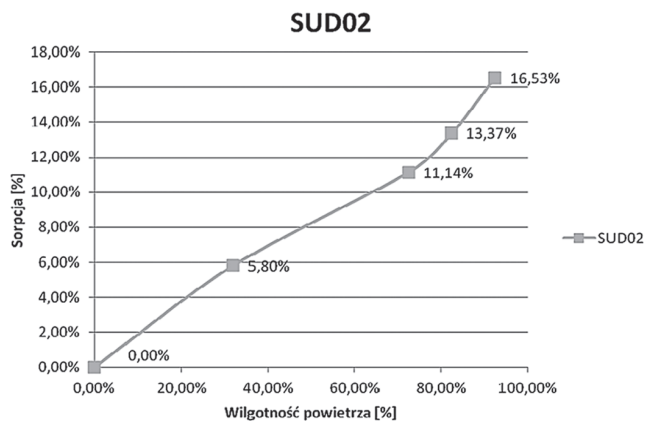


Fig. 10. Sorption curve of the SUD02 sample

There is no information on the size of sorption in the manufacturers' technical sheets, therefore the values obtained can not be compared and assessed of compliance with the declared values.

## 5. Effect of air humidity

To determine the effect of air humidity on the thermal conductivity coefficient, five types of wood-based panels of varying density were selected and placed in a climatic chamber. Samples were seasoned at air humidity equal to 32–33%, 70–75%, 80–85%, and 90–95% to stabilize the sample mass. Each time, the humidity in the climatic chamber was controlled using a hytherograph.

All materials were tested in a one temperature of 12.5°C. Each of the samples was weighed at 0% moisture and at each subsequent in which it was seasoned. Below is an example of a table with results (Tab. 5), a graph showing the dependence of the  $\lambda$  coefficient and air



humidity for two samples from the same material (Fig. 11), a collective plot of the  $\lambda$  coefficient and the air humidity of the fibreboards tested (Fig. 12), and bar graph for average results of the  $\lambda$  coefficient. The types of boards were arranged in order of increasing density. (Fig. 13).

Table 5. The results of the impact of air humidity on the  $\lambda$  coefficient for five selected materials

The designation of the sample	$\lambda$ [W/mK]				
	U1=0; L1=25				
	0%	32–33%	70–75%	80–85%	90–95%
SUD02	0.04401	0.050170	0.057360	0.059740	0.063575
STD05	0.03779	0.044230	0.052185	0.055380	0.059125
SB06	0.04498	0.049065	0.053975	0.056480	0.058730
FPS20	0.04814	0.052305	0.056380	0.060495	0.064075
FT40	0.03808	0.042395	0.048225	0.052065	0.056235

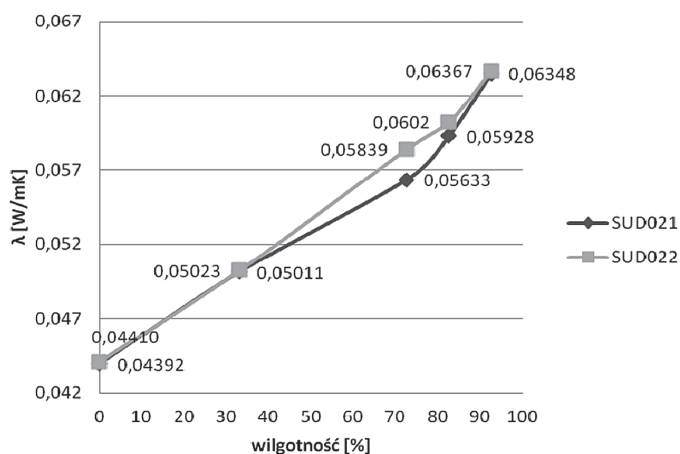


Fig. 11. The dependence of the  $\lambda$  coefficient and the air humidity for SUD02

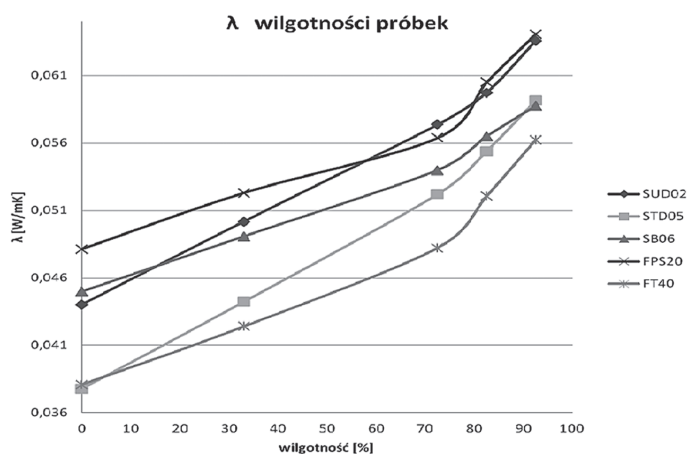


Fig. 12. Average dependence of the  $\lambda$  coefficient and air humidity of all samples

The graphs show a non-linear course of the dependencies. With each material examined, it was observed that the thermal conductivity coefficient increases with increasing humidity.

In order to compare the impact of air humidity on the thermal conductivity of selected materials, a graph of the percentage increase in the  $\lambda$  coefficient was made, assuming that the base value is the value of  $\lambda$  determined at 0% humidity. Different sizes of the increase in the  $\lambda$  thermal conductivity coefficient for materials determined at similar humidity may result from the different structure of the material, density, and sorption capacity.

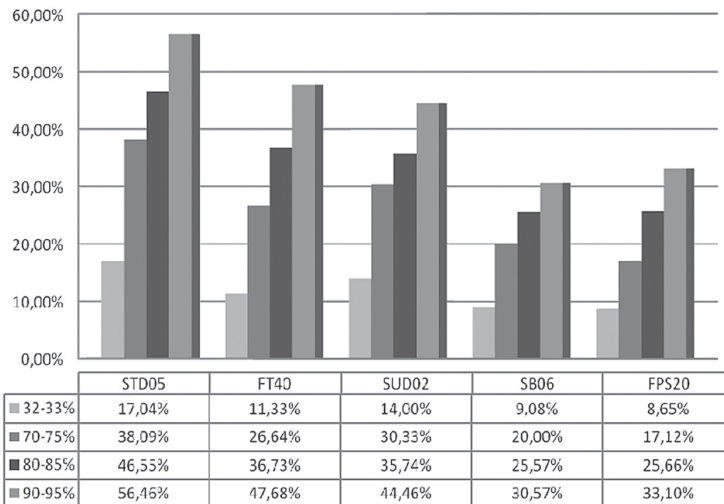


Fig. 13. The percentage increase in the  $\lambda$  coefficient value depending on the air humidity

## 6. Effect of density of materials

In order to determine the effect of density of wood-based materials on the thermal conductivity coefficient, the table presents the results of samples density and the  $\lambda$  coefficient values obtained from tests carried out on samples with 0% moisture and tested at 12.5°C.

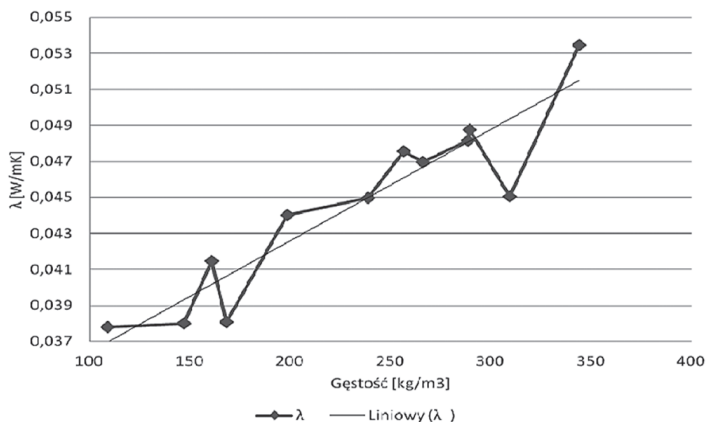


Fig. 14. Graph of dependence of the thermal conductivity coefficient and the density of materials tested

Table 6. The values of the thermal conductivity coefficient in terms of materials' density

The designation of the sample	Density (average)	$\lambda$ tested (average)
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/m·K]
SP01	256	0.04758
SUD02	199	0.04401
ST03	147	0.03800
SPD04	161	0.04146
STD05	109	0.03779
SB06	239	0.04498
SU07	266	0.04698
SPH081	344	0.05344
FI091	309	0.04504
FPT101	905	0.07295
FPS20	288	0.04814
FW30	289	0.04875
FT40	168	0.03808
Chipboard 1	635	0.10220
Chipboard 2	590	0.09561
Chipboard 3	643	0.10130
OSB 1	561	0.08816
Plywood 1	710	0.12730
Plywood 2	629	0.11640

The trend line shows an increase in the thermal conductivity coefficient with increasing density. The graph obtained does not illustrate the actual situation, because the values should be more similar to the trend line, such a discrepancy may be related to various methods and the specificity of the process of fibreboards production.

## 7. Conclusions

- There is too little information in the technical specifications.. The information on the temperature and air humidity in which the thermal conductivity coefficient was determined has not been included,
- The  $\lambda$  coefficient determined at 0% moisture of the samples and the temperature of 12.5°C in all tested samples was close to the one declared by the producers, which may mean that this coefficient was determined by the manufacturers in similar conditions.
- For most materials the thermal conductivity coefficient value declared by the manufacturer was higher than that obtained in the laboratory.
- Regardless of the type of wood-based boards, as the temperature of the test rises, the thermal conductivity coefficient also increases. When the test temperature increased from 12.5°C to 42.5°C, the percentage increase in the thermal conductivity coefficient ranged from 2.56% to 8.55%.
- There is no information on the value of sorption in the manufacturers' technical sheets, therefore the values obtained can not be compared and assessed of compliance with the values declared.

- The thermal conductivity coefficient increases with increasing humidity. With an increase in air humidity from 0% to 95%, the percentage increase in the thermal conductivity coefficient ranged from 8.65% to 56.46%.
- When testing the effect of density on the thermal conductivity coefficient, a graph that does not show the actual situation was obtained, the values should be closer to the trend line. Such a discrepancy may be related to various methods and the specificity of the manufacturing process of wood-based materials.

## Bibliography

- [1] Garbalińska H., Bochenek M. *Ocena możliwości wyznaczania izoterm sorpcji dynamiczną metodą DVS – na przykładzie betonu komórkowego klasy 700*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury JCEEA, XXXIV (64) (2/II) (2017) 245–252.
- [2] Instrukcja obsługi instrumentu Laser Comp FOX 314.
- [3] PN-EN 12524:2000 *Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe – Tabelaryczne wartości obliczeniowe*.
- [4] PN-EN ISO 10456:2009 *Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe – Tabelaryczne wartości obliczeniowe*.
- [5] Praca zbiorowa pod kierunkiem P. Klemma: *Budownictwo ogólne. Tom 1. Materiały i wyroby budowlane*. Arkady, Warszawa 2005.
- [6] Praca zbiorowa pod kierunkiem P. Klemma: *Budownictwo ogólne. Tom 2. Fizyka budowli*. Arkady, Warszawa 2005.
- [7] Trochonowicz M., Kołodziejczuk N. *Wpływ temperatury, wilgotności i kierunku badań na wartość współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$  w różnych gatunkach drewna*, Budownictwo i Architektura 14(4) (2015) 149–156.
- [8] Trochonowicz M., Witek B., Chwiej M. *Analiza wpływu wilgotności i temperatury powietrza na wartość współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$  materiałów termoizolacyjnych stosowanych wewnątrz pomieszczeń*, Budownictwo i Architektura 12(4) (2013) 164–176.

## Zhovkva (Żółkiew) in Western Ukraine – an example of urban complex of the Renaissance “ideal town”

**Mykola Bevz**

*Lviv Polytechnic National University, 12 Bandery str., 79013 Lviv, Ukraine, bevmist@polynet.lviv.ua*  
*Lublin University of Technology, 40 Nadbystrzycka str., 20-518, Lublin, Poland, m.bevz@pollub.pl*

**Abstract:** The town of Zhovkva (Żółkiew) belongs to the late Renaissance foundations of private resident towns in Western Ukraine (Halychyna region) from the late 16<sup>th</sup> century. In accordance with historical sources, this city was founded by Stanisław Żółkiewski [2] in 1594. Urban-spatial structure of the town was designed according to the Renaissance ideal city. The city has a well-preserved original planning structure and a number of architectural monuments that are associated with it. The city consisted of two conjugated parts: the owner’s castle and the fortified middletown. The combination of these two parts was of a specific nature – when the central square of the town is combined with the facade of the castle complex.

On the base of the historical and urban studies presented the hypothesis that town of Zhovkva (Żółkiew) is an unique example of late Renaissance urbanism. The start of town build was in 1594 according to a project based on the concept of “ideal town” from the book of Italian architect Pietro Cataneo. We are thinking, that the author of the project and plan of town was Paolo Clamensi – Italian architect, worked in Lviv at the end of 16<sup>th</sup> century. The towns have a well-preserved original Renaissance planning structure and a number of architectural monuments that are connected with it.

**Keywords:** town of Zhovkva (Żółkiew), town planning structure, Renaissance, «ideal city» model, urban composition.

### 1. Introduction

In recent years, interest in historic cities has grown significantly in connection with the intensification of international scientific cooperation in the Eastern Europe related to studying and popularizing the architectural and urban heritage. This interest is also related to the identification of applicants for inclusion in the UNESCO World Heritage List [1]. In the list of historic cities of Ukraine, the attention is first of all drawn to the well-known large objects – Lviv, Kyiv, Kharkiv, Kamianets-Podilskyi and Chernihiv. The ensemble of the historic center of Lviv has been in the list of UNESCO heritage sites since 1998. A part of the town center of Chernivtsi (an ensemble of sacred and administrative buildings of the Residence of Bukovinian and Dalmatian Metropolitan of the 19<sup>th</sup> century) was listed in 2011. There are very valuable urban complexes in the structure of small Ukrainian towns as well. Even today, the value of such cities or towns in Ukraine is often not very noticeable either because of insufficient scientific study of their architectural history or due to insufficient coverage in leading scientific journals. To a large extent, this situation can be explained by the fact that in 1950–1980 no thorough research was carried out in the field of historic urban planning.

That is why, one of the small historic towns in the Western Ukraine was selected for study and present its urban and architectural values.

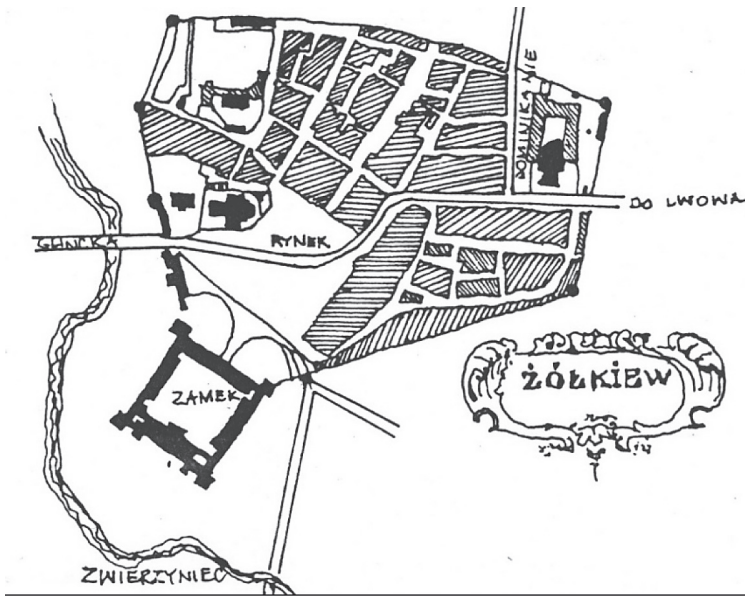


Fig. 1. The reconstruction of planning structure of town of Zhovkva (Żółkiew) by Jan S. Zubrzycki, 1901 [2, s. 1–2]. The defensive towers author located in western and eastern parts of town walls only

## 2. Analysis of urban development of the town of Zhovkva (Żółkiew)

Zhovkva belongs to one of the insufficiently studied, but highly important urban-planning formations in the Halychyna region (Western Ukraine). The town is located 23 km north-west of Lviv. Zhovkva is the modern title of the town. In the historical documents, it is named Zholkiew (or Żółkiew, pol.) – this was also the name the family town of Żółkiewski in the Lublin region [3, 4]. Next to the official name, Ukrainian casual “Zhovkva” was also used, which was established as a modern name. During the times of the Soviet Union, for a short period, it was inappropriately called “Nesterov” [5].

Scientific and academic works which have appeared in the recent years state that Zhovkva is an example of late Renaissance urbanism and was built in late 16th century according to a project based on the concept of “ideal town” [6, 7, 8]. In accordance with historical sources, this town was founded by Stanisław Żółkiewski (Zholkevski) in 1594 on the territory which was part of the village Vynnyky [3]. Wysotski’s family (Wysocki in Polish) owned the village at that time. Foundation of the town took place on the eastern bank of the Svynia River, near the old castle of the Wysockis. It is interesting that in the middle of the 19th century, the bridge over the river which led to the western gate of the town did not belong to the town, but to the territory of the village. That is to say, the agreement between Stanisław Żółkiewski and Michał Wysocki on the transfer of the part of the settlement territory, gave the old owner control over the bridge and, of course, over the bridging tax collection. Unfortunately, only archeological traces remain from the castle of Wysockis.



Nowadays, Zhovkva has become the object of broader studies by historians and architects [9–14]. In particular, in 2016 was published the so-called “atlas of the town” [15] in which the general stages of its development are reconstructed. In 1995, according to the decree of the Government of Ukraine, the historical part of the town received the status of the State Historical and Architectural Conservation Area. The Conservation Area is still functioning, managing the restoration works in the castle and in the central part of the town.



Fig. 2. Photo of central square of town of Zhovkva (Żółkiew) at the beginning of 20th century. The blocks of late Renaissance buildings with loggias-arcades in parter (northern part of square) (<http://www.polona.pl, zolkiew, 10.11.2018>) [16]



Fig. 3. Today photo of central square of town of Zhovkva, M. Bevez, 2018

Today one of the architectural objects of Zhovkva is included to the UNESCO list of world cultural heritage from Ukraine. In 2013, the wooden church of the Holy Trinity, located in the Zhovkva suburb at the road from Lviv, was added to this list. The church is one of the 16 shrines of the joint Ukrainian-Polish nomination “Wooden churches of the Carpathian region of Poland and Ukraine” [17]. This church, which was built in 1720, has a unique, renaissance iconostasis of high art value. It is characteristic that the iconostasis was created by masters of the local Zhovkva painting guild. It was probably transferred to the Church of the Holy Trinity from an older church. It is evidenced by the very architecture and design of the iconostasis, showing the rebuilt parts of it, “fitted” to the size of the church interior [18].

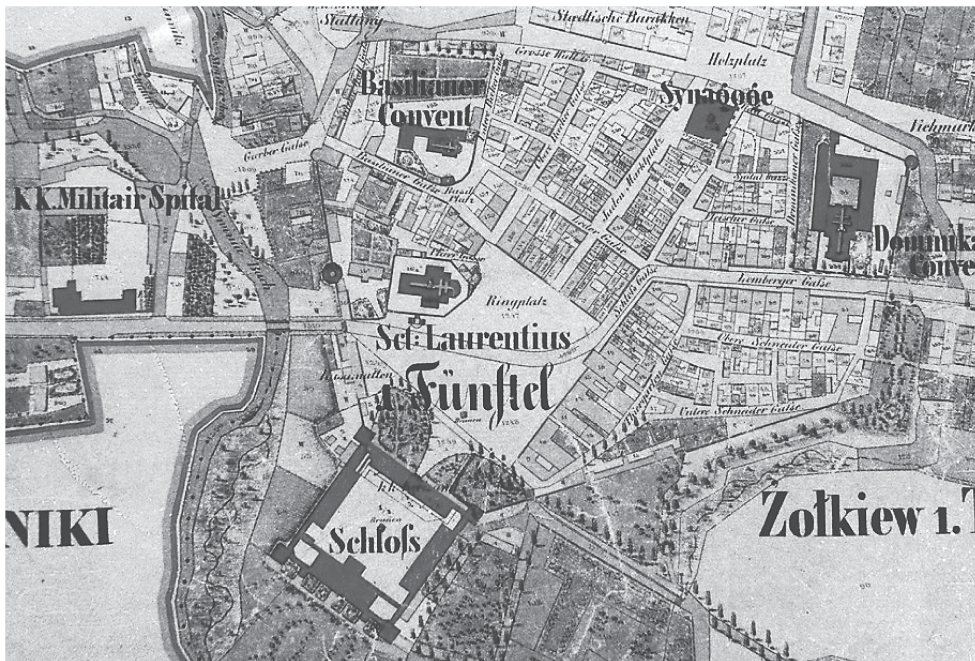


Fig. 4. Central part of the town of Zhovkva (Żółkiew) on the cadastral map 1854 [15]

According to the characteristics of its historical architectural and urban structure, Zhovkva complies with the main requirements of the “List of historical settlements of Ukraine” regarding to the uniqueness, authentic town and consistency of the heritage. The town has a well-preserved original Renaissance planning structure and a number of architectural monuments that are associated with it. The existence of a Renaissance plan makes the town to some extent unique both in Ukraine and in the Eastern Europe as a whole. The wooden church of the Holy Trinity is one of the reference objects of the Renaissance town planning. It is located in the place where a defensive gate at the entrance to the fortified suburbs on the road from Lviv was [18].

By the time of foundation, Zhovkva is among the cities of the late Renaissance, which arose on the eastern borders of the Polish-Lithuanian Commonwealth, creating a system of fortified settlements to strengthen the defense capacity of territories which were often attacked by southern neighbors (Tatars and Turks). However, the architectural and planning features of this fortress town have not yet been the subject of special scientific consideration



in comparison with the defining examples of European Renaissance urbanism (fig. 2, 3, 4). Today, the researchers have not yet elaborated on the genesis of the Zhovkva Planning Pattern; the specific characteristics of its Renaissance town-building composition have not been identified and compared with similar implementations in other parts of Europe, although in general, the identity of the town plan was emphasized in the work of architects-scientists O. Sosnowski [19], V. Chornovus [20], S. Kravtsov [21], A. Martyniuk-Medvetska [22], I. Krypyakevych [23], M. Książek [24], K. Kuśnierz [25,26], H. Yaremych, Y. Kalika [27], and others. In our previous publications, we have already covered the issues of uniqueness of urban studies in Zhovkva [6, 7, 8], so now we are trying to develop this topic further. We believe that the immediate task of academics should be to explore the scheme of the planning structure of Zhovkva at the time of its foundation, to find out its prototypes and compare the architectural and urban composition of Zhovkva with other objects of European urbanism of the Renaissance age (fig. 3, 4, 5).

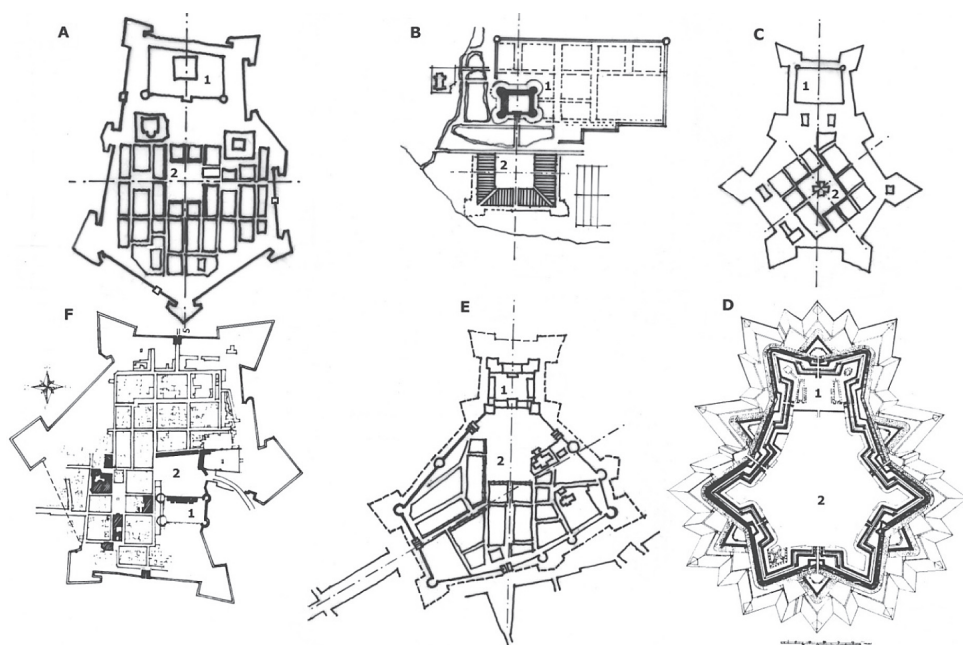


Fig. 5. Comparative analysis of town plans (towns located at 16–17 century) by M. Bezv [7]: A – Zamość; B – Krasieczyn; C, D – Stanislaw; F – Sabbioneta; E – Zhovkva; 1 – castle, 2 – inner town

The history of the appearance of Zhovkva on the historical map of Halychyna is special. This town was founded in the last years of the 16th century as a private fortified residence town. The times of the town's foundation were marked by a constant threat of military actions in the territory of the Western Ukraine and, in particular, in Halychyna. Poland, Ukraine (which strived for autonomy), Turkey, Austria, Tataria, Wallachia and Transylvania confronted each other here. Constant wars made our territory to one of the most active new fortress-town construction areas in Europe in the 16<sup>th</sup>–17<sup>th</sup> centuries. Almost all these new cities were private, that is, they were founded by the rich owners of large land latifundia [27, 28].

The development of the construction of private cities in Ukraine in the 16th and 17th centuries, unfortunately, has not yet been studied. The causes and geography of such cities

are also not highlighted. However, citing the article of K. Kuśnierz can be argued that urbanization processes in Halychyna at this time occurred in much larger scale than in the rest of Poland [29]. This era left extremely valuable examples of urban planning, most of which, unfortunately, have been reconstructed or completely destroyed in later times (for example, the planning structures and fortifications of the cities of Berezhany, Rohatyn, Uhniv, Kukeziv, Vasiuchyn, Kniahynychi, Burshtyn, Svirzh and many others [30]).

Another characteristic feature of urban planning at the end of the 15th century is the emergence and expansion of new concepts of the town planning in Halychyna and Ukraine, based on the imitation of Italian planning structures for the construction of the «ideal town» of the Renaissance. Italian architects, many of whom worked at the princely or noble courts, at monastic orders (for example: Pietro Sperendio, Bernardo Morando, Aurelio Passaroti, Giacomo Briano, Paolo Clamensi etc.), or those who settled as practicing architects in larger cities, encouraged this. For example, about ten architects of Italian origin practiced in Lviv at the turn of the 16th and 17th centuries – Paolo Dominici, Pietro di Barbona, Ambrosio Nutklaus and other [31].



Fig. 6. Buildings with loggias-arcades in the central part of town of Zhovkva (drawing of beginning of the 19<sup>th</sup> century) Zhovkva. Atlas ukrayinskykh istorychnykh mist. T. 3. Sc. Editor M. Kapral, Lviv, 2016, p. 32) [15]

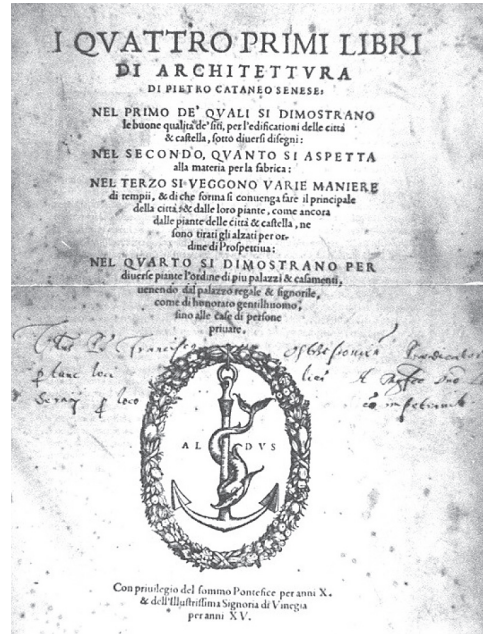


Fig. 7. Title page of the book of Pietro Cataneo Senese (Quattro primi Libri di Architettura di Pietro Cataneo Senese. – Venetia: 1567. – P. 1. [32]. Photo by M.Bevz)

The inspiration and the implementation behind the state-of-the-art urban planning ideas were the princely or noble ranks of the Polish state [33], which included Halychyna at that time. Halychyna and then all of Ukraine, through hereditary law, passed under the control of the Polish king at the end of the 14th century. Accordingly, all the Ukrainian (Ruthenian) gentry or prince's families were in the service of the Polish king and occupied some of

the high posts in the Polish state. Particular efforts in such activity were shown by the ancient Ukrainian noble families who owned huge estates in the east of the Polish state i.e. in Halychyna, Podillya, Kyiv region, and belonged to the cohort of the richest people in the kingdom (for example, the Ostrogskis, the Vyshnevetskys, the Sieniawskis, and others as well as the Żółkiewskis). At the time of the founding of Zhovkva, Stanislav Żółkiewski had a high state office and title of crown hetman and had significant estates in the Ruthenian, Belz, Lublin and other voivodeships [3].

The creation of well-fortified private residential cities in Ukraine, as we see, was a well-prepared and characteristic phenomenon for that time. In addition to military factors, the construction of such cities was determined by the presence of relevant customers and by their financial capacity, by the corresponding development of engineering and architectural thought; there was economic reasonability of building new cities (fig. 4, 5, 15).



Fig. 8. Synagogue in the town of Zhovkva (Żółkiew) had a Renaissance forms. Photo from 1901 [2]. The place of localization of Turynetska gate

Zhovkva was one of the earliest realizations of the concept of “ideal town” on Ukrainian lands. There are not many Ukrainian cities that have preserved the Renaissance structure to this day. A part of the specialists include Sharhorod in Vinnytsia region which was founded in 1580 by the Chancellor of the royal court Zamojski with the participation of architect Bernardo Morando to such objects. However, the detailed study of the building system which was conducted in 1988 (Yu. Nelhovskiy) and in 1994 (T. Trehubova) [34] did not find traces at the site that would sufficiently confirm the Renaissance planning and fortification which were characteristic of that time. According to T. Trehubova, the structure of the central part of Sharhorod, which is preserved to our time in rather full historical form, does not confirm the Renaissance principles of its planning layout [34]. Therefore, the planning model of the town and the nature of its lost fortifications from the 15th century remain the subject of theoretical scientific discussions and hypotheses.



To the later implementations of the ideal town concept belongs Stanislav (Ivano-Frankivsk; fig. 5). Until the 1970's, this town still retained the remains of its bastion fortifications, but they were destroyed during the reconstruction of the town center for the construction of a Soviet administrative building. This construction destroyed the unique layout of the town center, which distinguished this town from other historic cities of Ukraine.

Experts estimate that there are many more cities in Halychyna, which, at the time of foundation, did not receive a purely Renaissance but a transitional architectural and planning style with elements of a medieval and of a Renaissance town. These include Berezhany, Ternopil, Nemyriv, Novi Strilyshcha [29, s. 19–20] and other cities.

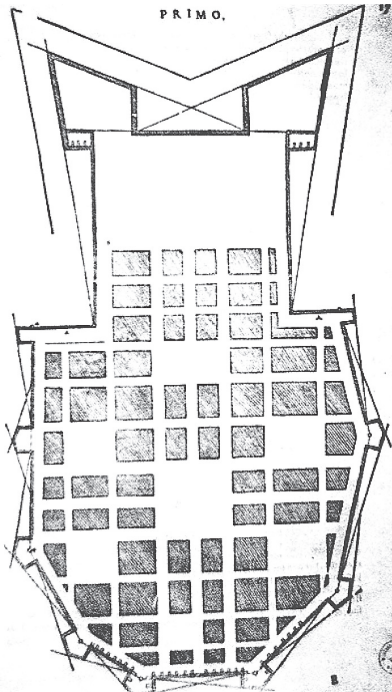


Fig. 9. The planning model of town plan with an irregular perimeter in the book of Pietro Cataneo Senese (I Quattro primi Libri di Architettura di Pietro Cataneo Senese. – Venetia: 1567, p. 19) [32]. Photo by M. Bevz

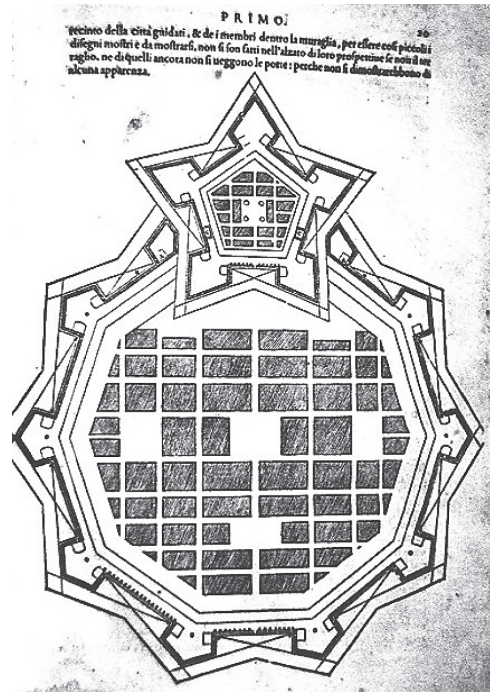


Fig. 10. The planning model of town plan with a regular perimeter in the book of Pietro Cataneo Senese (I Quattro primi Libri di Architettura di Pietro Cataneo Senese. – Venetia: 1567, p. 20) [32]. Photo by M. Bevz

Brody also belonged to one of the earliest Renaissance cities in Ukraine. Interesting is that this town, which in the beginning was called Lubycz, also belonged to the possessions of Żółkiewskis [3, 5]. The founding of the town, like in the case with Zhovkva, was carried out at the initiative of hetman Stanislav Żółkiewski, but 14 years earlier, in 1580 (S. Kravtsov presents another date of the laying of Brody – 1584 year) [36]. The town is located relatively not far away from Zhovkva, 70–80 km to the north-east. It consisted of a castle and a town located on an island in the middle of a large pond. The original planning of the town has not survived to the fullest. In 1630, Stanisław Koniecpolski, the new owner of the town, carried out a radical reconstruction, enlarging its territory and transforming its planning structure [37].



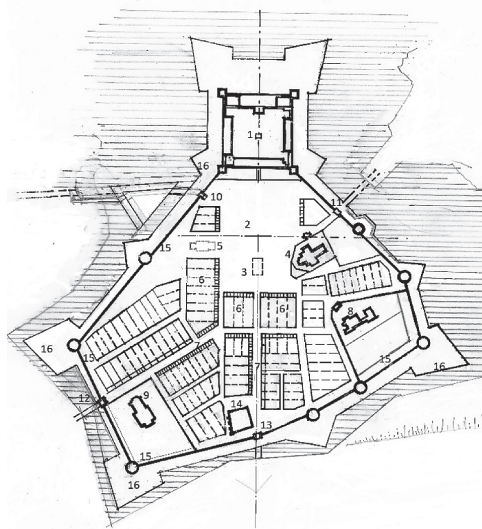


Fig. 11. The planning scheme of town of Zhovkva; on the time of 17 century by M. Bevz [7]

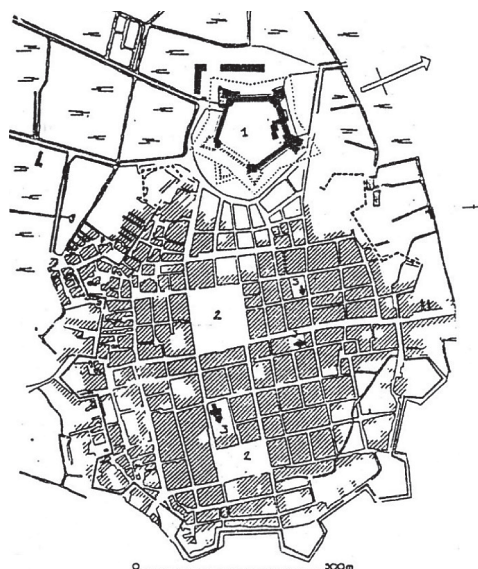


Fig. 12. The planning scheme of town of Brody; on the time of 17 century by M. Kalinowski [36]

### 3. Discussion and main achievements

Based on the stated before, we can assert that in this way Zhovkva remained the oldest preserved example of the Renaissance ideal town in Ukraine. And, what is important, the state of preservation of the town's building and planning system is relatively good and allows us to rely on its fruitful studies in various fields – archeology, history, study of architectural and art monuments, study of Renaissance urbanism and architecture [7].

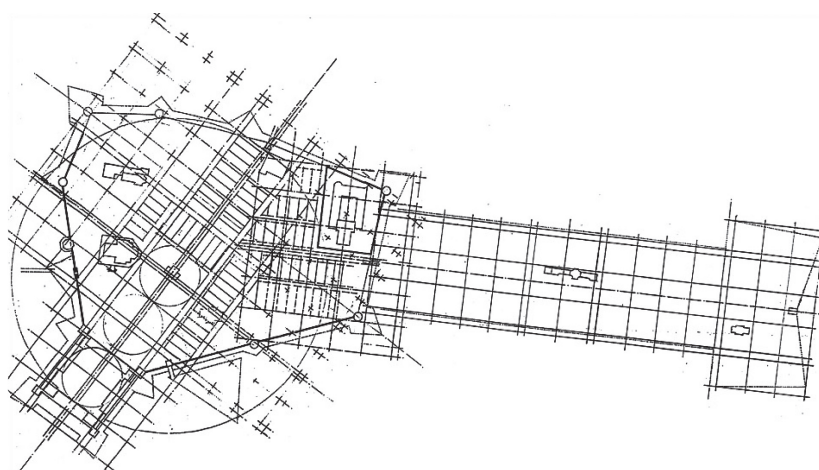


Fig. 13. The reconstruction of planning model of town of Zhovkva (Żółkiew) at the time of 16–17 century; by M. Bevz [38]. Basic module – 43.2 x 43.2 m; left part – middle town (founded 1594; right part – Lviv suburb (founded – 1609)

The analysis shows that the general spatial composition, the layout of the town, the nature of its development, the original planning structure of functional zoning is fully consistent with the principles of Italian Renaissance urbanism. In support of this, it should be said that there has been a common main planning axis of the town and the castle that has run from the Turynetska Gate through the modern Zaporizka Street, divided in half the Market Square, run through the main gate to the castle complex, and after having entered inside its courtyard, it ended at the main entrance and facade of the palace. The characteristic techniques of Renaissance urbanism and architecture used in Zhovkva include:

- “framing” of public spaces of the town (central square and main streets) houses with loggias-arcades (fig. 2, 3, 4, 6, 15, 16);
- application of Renaissance attic completions in decorating of the top of facades of houses (fig. 6, 14);
- location of the temple on a characteristic platform and with elevation above the square (fig. 2, 3, 11, 14);
- application of a democratic multi-ethnic scheme of settlement with the location of the temple in each national district (fig. 13, 15);
- presence in the town of an educational academic institution (functions of which could be hypothetically attributed in the beginning to the so-called Zhovkva fraternity and its school, which operated from 1612, and later to the Basylian Monastery, well-known for its educational activities [38]);
- typical Renaissance planning composition of the central square with the presence of streets or alleys in the middle of the framing quarter (fig. 3, 4, 13, 15).

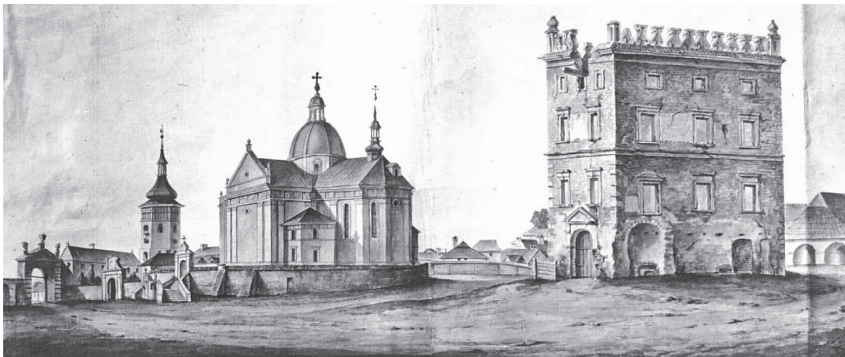


Fig. 14. Drawing of Rynok square in Zhovkva (Żółkiew) with the church and town hall building at the last years of the 18<sup>th</sup> century [39]

A special feature of the Renaissance cities was the rule of planning a special square in front of the residence of the owner of the town. Most often, these squares were planned separately from the rest of the more utilitarian squares of the town and formed a special front space in front of the owner's palace (for example, here can be mentioned the cities of Zamość, Quastalla, Sabbioneta etc.) [40, 41]. One of the most important features of Zhovkva is that this square was combined here with the main public and commercial square of the town. That is, Zhovkva belongs to the so-called classical planning type of the Renaissance town, when the perimeter of the defensive walls of the castle touches the town ring of fortifications with one side, and on the other, it is an example of the so-called «compositional combination» of the owner's castle and the main square of the town [41] (fig. 15). This type of layout was not

very common. Two similar cities from this list can be mentioned here (except for Zhovkva) – Krasieczyn in Poland and Sabbioneta in Italy [41, 42] (fig. 5).

In the early Italian version, the residential square in front of the castle was formed at the entrance to the prince's palace through the expansion of the street (along the entire length of the palace facade). The example for this is the square-street in front of the Palazzo Pitti in Florence. Therefore, it can be argued that the planning of the square used in Zhovkva has certain associations with early urban building experiments in Italy. On the other hand, the combination of ceremonial (castle) and public town functions in the Zhovkva's main square is very interesting for contemporary urban planning practices. Especially, since the final assignment of the solemnly-representative functions (ceremonial places near the palace) to main squares of the residential cities took place only in the middle and second half of the 17th century, mainly in the French projects of ideal cities, in particular in the projects of Jean Errard Bar-le-Duc [43, 44], also in the project of ideal town by Adam Freytag (1631) [44].

It is important to highlight another prerequisite for the emergence of Zhovkva – the state of development of urban science at the time of laying the foundations of the town. In view of this, among the theoretical works of the architects who worked out the principles of the planning layout of the ideal town, we must highlight exactly those treatises which preceded our construction in the time of their appearance. Their list is not very long. These are the treatises of Francesco di Giorgio Martini (1501), Pietro Cataneo (1550, 1567), Daniele Barbaro (1567) and Bartolomeo Ammanati (1570) [45]. In particular, the works of these authors could have served as a model for the planning works in Zhovkva, since they were published and distributed among architects before 1580–1590s. In these works, we often find suggestions for the installation of defensive urban fortifications, mainly in the form of walls with semicircular bastions [7].

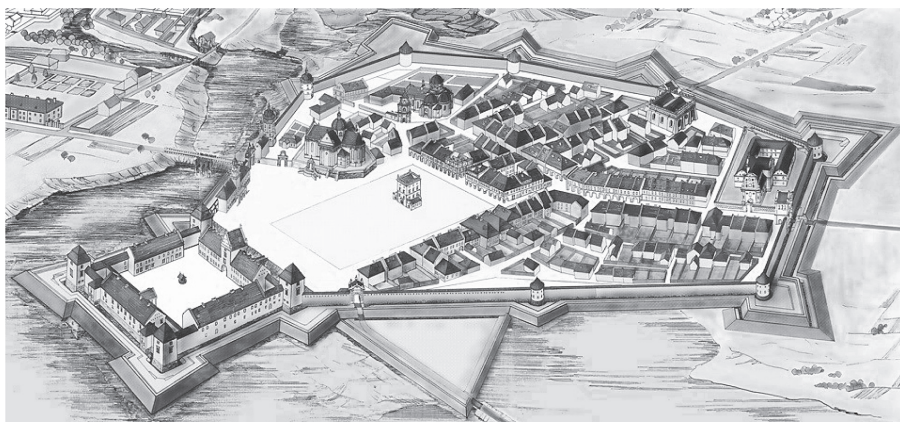


Fig. 15. Hypothetical reconstruction of view of town of Zhovkva (Żółkiew) in 17<sup>th</sup> century. Authors: Mykola Bevz, Olga Okonchenko, Ihor Okonchenko [46]

In view of this, it becomes clear to some extent why the old system of fortifications (defensive walls, towers and bastions) were used in Zhovkva, rather than a completely new bastion one. However, it should be noted that the entrance gates to the town are already implemented under the new system, as well as the fact that along with the defensive walls was implemented an additional line of earth bastions. However, the researchers do not have a unanimous opinion about the time of its occurrence. It is believed that it might have appeared somewhat later. Though, one should pay attention to the fact that documents from 1621 mention almost



finished defense structures of the town and Zhovkva is named there as “complete fortress” [3]. It should be noted also that the documents of 1621 indicate the existence of builded four town gates – Lvivka, Zvirynetska, Glynska and Jewish (Turynetska). Thus, we can assume that they are also not products of later time. This fact makes it possible not to doubt that the town had already had a bastion defense line. That is, it is quite probable that the entire system of urban fortifications was built in a relatively short time – from 1594 to 1621. Such a combination of new and old defense construction systems in Zhovkva is very interesting and requires more detailed study and more precise dating. In particular, a comprehensive archaeological study of selected sections of the defensive walls and adjacent bastions could be very useful.

If we carefully analyze the plans of cities proposed by the aforementioned Italian theorists of urbanism, it is easy to notice the great similarity of Zhovkva’s planning style to one of the theoretical projects of Pietro Cataneo [32, 47] (fig. 9–10, 11–12).

Even more interesting is the following fact: in the treatise by Pietro Cataneo two versions of the planning layout of the ideal town are worked out. The first has an irregular configuration of the outline of the plan and the second with a regular one (fig. 9–10, 11–12). Actually Zhovkva is similar according to the general compositional layout to the first irregular type. The second (regular) type is very similar to the planning of Brody. The planning structure of Brody was changed in the 1630s, when the town was enlarged and reconstructed. But there is enough evidence to suggest that this reconstruction was based on the previous planning pattern. This was particularly stressed in the studies by B. Chornovus [20]. And later, S. Kravtsov convincingly showed that the town consists of two parts – the Old and the New town, which have different planning basics and metric conformity [36, 37] (fig. 12).

If we recall that both Zhovkva and Brody were founded almost simultaneously by the same owner – Stanislav Zholkevski (Żółkiewski) – and perhaps by the same architect Paolo de Dukato Clamensi (called also as Pavlo Shchaslyvyi, Pawel Szczęśliwy) [4, 5], then this resemblance appears to be not accidental. We can suggest that these Western Ukrainian cities are a unique realization of the theoretical project concepts of the ideal Renaissance town of Pietro Cataneo.



Fig. 16. Photo of the northern-east corner of Rynok square and the beginning of Lvivska street, 1910 [48]. The building located in the next corner of the Lvivska Street has loggias-arcades

Of course, our hypothesis requires even more in-depth research, a serious sequential argument, and a meticulous comparison with the theoretical or realized models of Renaissance town-planning in Italy and in other countries. However, even the above facts suggest that Zhovkva and Brody should be regarded as worthy of more attention in the field of national and European urbanism in the late 16th – early 17th centuries.



Fig. 17. Building with loggias-arcades in town of Żółkiew. Drawing by O. Mann, 1923 [49]. This building was located on the corner of today Korotka street and Zaporizka street. On the cadastral map of 1854 p. in this place marked wide building (fig. 4) with loggias-arcades from the side of the Juden Marktplat



Fig. 18. The corner of building loggias-arcades from the side of Korotka street (Skorzana street in the past) on the post card of 1909. [50]. Basilian monastery is on the second plan

## 4. Conclusions

1. The town of Zhovkva (Żółkiew) belongs to the late Renaissance foundations of private residential towns in the territory of the Polish state at the end of the 16<sup>th</sup> century. The urban-spatial structure of the town was designed according to the scheme of the Renaissance “ideal town”. In case of Zhovkva, the spatial structure of the town consisted of two conjugated parts: the castle and the fortified inner town. The combination of these two parts, when the central square of the town is combined with the main facade of the castle complex – was rare.
2. Zhovkva is one of the towns where the author is known – the Italian architect Paolo de Ducato Clamensi (known in Lviv under the name “Pavlo Shchaslyvyi”, “the Happy Paul”), a member of Lviv craft masonry guild, who at the time was in service of hetman Stanislav Zholkevski (Żółkiewski). In 1601–1612 he was appointed by the owner of the town for the position of head of the town court. The construction of the castle and the town became an ambitious project and a life-long affair for the architect.
3. The materials of the analysis allow us to state the hypothesis, that the architect Paolo Clamensi planning the town used theoretical treatises in its architecture and urban structure. We believe that he implemented one of the schemes of an „ideal town”, which was described in “Four Books on Architecture” by Pietro Cataneo (published in Venice in 1567). Thus, Zhovkva is one of the only European towns built on the base of the Cataneo’s theoretical model.

## References

- [1] <https://whc.unesco.org/en/statesparties/ua>. Tentative list (25.06.2018).
- [2] Jan Sas Zubrzycki. *Żółkiew. Studium architektoniczne*. Kraków, 1901. 54 s.
- [3] Barącz Ks. Sadok. *Pamiętki miasta Żółkwi*. Drugie wydanie. Lwów, 1877. S. 12.
- [4] Yaremych H. *Zhovkva – istorychne misto-zapovidnyk*, [in:] *Halyts'ka brama*. L'viv: „Tsentr Euvropy“, 1997, № 4/28, c. 5.
- [5] Kalika Y., Yaremych H. *Nesterov. Putivnyk*. L'viv, Kamenyar, 1990.– S. 1–52.
- [6] Mykola Bevz. *Architekturno-prostorovyi ukhad mista Zhovkvy v konteksti europeiskoyi urbanistyky*, [in:] *Halyts'ka brama*, Lviv: „Tsentr Euvropy“, 1997, № 4/28, c. 6–7;
- [7] Bevz M. *Zhovkva – renesansne idealne misto. Ukrainska realizatsia kontseptualnoji shemy Pietro Cataneo*, [in:] *Istorychna, mystetska i architekturna spadshchyna Zhovkvy: problemy ochorony, restavratsii ta vykorystannia*. Zhovkva-Lviv, 1998. S. 36–43.
- [8] Bevz M., Okonchenko O., Okonchenko I. *Doslidzhennya budynku na “vezhi” po vul. Vasylians'kiy u m. Zhovkvi*, [in:] *Arkhitektura: Visnyk Natsional'noho universytetu “L'vivs'ka politekhnika”*, L'viv, 2002. №439, S.128–133.
- [9] Kalika Y.A., Yaremych H. *Nesterov. Putivnyk*. L'viv: Kamenyar, 1990.– S. 15.
- [9] *Zhovkva kriz' stolittia. Naukovyi zbirnyk*. Vypusk 1. Zhovkva, 2010, 557 s.
- [10] *Zhovkva kriz' stolittia. Naukovyi zbirnyk*. Vypusk 2. Zhovkva, 2012, 389 s.
- [11] *Zhovkva kriz' stolittia. Naukovyi zbirnyk*. Vypusk 3. Zhovkva, 2014, 341 s.
- [12] *Zhovkva kriz' stolittia. Naukovyi zbirnyk*. Vypusk 4. Zhovkva, 2016, 402 s.
- [13] *Zhovkva – istorychne misto-zapovidnyk. Halyts'ka brama.– L'viv: „Tsentr Euvropy“, 1997, № 4/28, s. 1–30.*
- [14] Velykyi V., Golyak V., Kovalchuk M., Lytvyn M., Naumenko K. *Zhovkivshchyna: istorychny narys*. Zhovkva-Lviv-Baltimore: Instytut ukrayinoznavstva im. I. Kryp'yakevycha NAN Ukrainy. Zemlyats'ke ob'yednannya “Zhovkivshchyna“, 1994, Tom 1. 326 s.



- [15] Zhovkva. *Ukrainian Historic Towns Atlas*. Volume 3. Editor M. Kapral, Lviv, National Academy of science of Ukraine, 2016, 52 p. + 22 ill.
- [16] <https://polona.pl>. Żółkiew (10.11.2018).
- [17] Bevz M., Czuba M., Dubyk Y. and other. *Wooden tserkvas of the Carpathian region in Poland and Ukraine. Cultural property of the republic of Poland and Ukraine for inclusion in the World Heritage List*. Warsaw–Kyiv, Lviv: Rastr-7, 2011. T. 1–2, T. 1, 291 p., T. 2, 151 p.
- [18] Bevz M. *Zhovkva. Tserkva of the Holy Trinity. Brief history of the site*, [in:] *Wooden tserkvas of the Carpathian region in Poland and Ukraine. Cultural property of the republic of Poland and Ukraine for inclusion in the World Heritage List*. Warsaw–Kyiv, 2011.– T. 1. – S. 162–166.
- [19] Sosnowski O. *O planach osiedli sprzężonych w Polsce*, Biuletyn Historii Sztuki i Kultury, 1935, t. IV, nr. 2, s. 69–78.
- [20] Chornovus V. *Urbanistychni kontseptsyi ideal'noho mista epokhy Vidrozhennya ta yikh realizatsiya na zakhidnoukrayins'kykh zemlyakh*, Naukovi zoshyty kafedry restavratsiyi ta rekonstruktsiyi arkhitekturnykh kompleksiv.– L'viv: Derzhavnyi universytet „L'vivs'ka politehnika 1993. № 1. C. 110–114.
- [21] Kravtsov S. *Slidy frantsuz'koyi shkoly u fortyfikatsiyakh Ukrayiny u XVII st.*, Fortyfikatsiya Ukrayiny. Materialy mizhnarodnoyi konferentsiyi. Kam'yanets'-Podil's'kyy, 1993, c. 24; Chornovus V. *Urbanistychni kontseptsyi ideal'noho mista epokhy Vidrozhennya ta yikh realizatsiya na zakhidnoukrayins'kykh zemlyakh*, [in:] *Naukovi zoshyty kafedry restavratsiyi ta rekonstruktsiyi arkhitekturnykh kompleksiv*. L'viv: Derzhavnyi universytet „L'vivs'ka politehnika 1993. № 1. C. 110–114.
- [22] Martyniuk A. *Rezultaty arkhitekturno-arkheolohichnykh rozvidok kvartalu na pl. Vicheviy, Halyts'ka brama*. L'viv: „Tsentr Yevropy“, № 4/28, c. 13–14.
- [23] Kryp'yakevych I. *Z mynuloho Zhovkvy*. Zhovkva: Prosvita, 1930. 30 s.
- [24] Książek M. *Materialy pomocnicze do studiow w zakresie historii urbanistyki*. Krakow: Politechnika Krakowska, 1994. 336 s., s. 227–237.
- [25] Kuśnierz K. *Sieniawa. Założenie rezydencjonalne Sieniawskich. Rozwój przestrzenny w XVII oraz XVIII wieku*. Rzeszów: 1984. 260 s., s. 142–157.
- [26] Kuśnierz K. *Miejskie ośrodki gospodarcze wielkich latyfundiów południowej Polski w XVI oraz XVII wieku*. Kraków: Politechnika Krakowska, 1989. S. 29–32.
- [27] *Polska XVII wieku. Państwo, społeczeństwo, kultura*. Pod red. J. Tazbira. Warszawa: Wiedza Powszechna, 1977. 368 s.
- [28] Książek M. *Zagadnienia genezy rozplanowania i typologii miast prywatnych XVI i XVII wieku w Południowej Małopolsce*. Kraków: Politechnika Krakowska, 1988. S. 159–162.
- [29] Kuśnierz K. *Zabytkowe wartości naczelné miasta historycznego dawnej Galicji na przykładzie Brzeżan, Brodów, Żółkwi oraz Stanisławowa*, Urbanistyczno-architekturni problemy mist Halychyny. L'viv–Kraiv: 1992. S. 19–20.
- [30] Bevz M. *Problems of Urban Restoration on the Example of Historic Cities of Western Ukraine*, Architektura bez Granic: Kultura Miasta – Miasto w Kulturze. – Wrocław: Politechnika Wroclawska, 2012. S. 102–111.
- [31] Vuytsyk V. *Istoryko-arkhitekturnyy zapovidnyk u misti L'vovi*. L'viv: Kamenyar, 1989. C. 5–20;
- [32] *I Quattro primi Libri di Architettura di Pietro Cataneo Senese*. Venetia: 1567. (Library of Department of Architecture, Warsaw Polytechnic).
- [33] Kostomariv M. *Istoryya Ukrayiny*. L'viv: NTSH, 1918. S. 160–165.
- [34] Trehubova T. *Starodavnye misto Sharhorod*, Teoriya ta istoriya arkhitektury. Kyiv: NDITIAM, 1995. – S. 57–71.
- [36] Krawtsov S. *O ukkladzie przestrzennym miasta Brody w XVI–XVII w.*, Kwartalnik architektury i urbanistyki. T. XXXVII. Zesz. 1. Warszawa: PWN, 1992. S. 3–4.
- [37] Kravtsov S. *Mistobudivna istoriya Brodiv ta Hiyom Levasser de Boplan*, Ukrayina v mynulomu. Vyp. IV. Kyiv–L'viv: 1993. S. 31–39; Sozans'kyy I. *Z mynushyny Brodiv. Prychynky do istoriyi mista*. L'viv: NTSH, 1911. 69 s.

- [38] Bevz M. *Mahdeburz'ke pravo ta urbanistychnyy ukhad pryvatnoho mista-rezydentsiyi (na pryklad m. Zhovkvy)*, Ukrayins'ka akademiya mystetstva. Doslidnyts'ki ta naukovy-metodychni pratsi. Vyp. 7. Kyiv, 2000. S. 68–75.
- [39] <https://polona.pl/item/zolkiew-w-koncu-18-wieku,NDAYMTgyMTY/0/> 11.10.2018.
- [40] Soldini N. *La costruzione di Guastalla // Annali di architettura*. Centro Internazionale di Studi di Architettura «Andrea Palladio». Vicenza: Electa. 1992–1993. N. 4–5. P. 57–87.
- [41] Zarębska T. *Funkcje i formy placów miejskich w Polsce XVI–XVIII w.*, Kwartalnik Historii Kultury Materialnej. Nr. 2. 1993. S. 206–208.
- [42] J. Kowalczyk. *Zamość. Citta ideale in Polonia*, Krajobrazy. Studia i materiały. Warszawa: Ośrodek ochrony zabytkowego krajobrazu. Narodowa instytucja kultury, 1994. S. 48–49.
- [43] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean\\_Errard](https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean_Errard) (27.06.2018);
- [44] „*Klar und lichtvollwieeine regel*”. Planstädte der Neuzeit. Vom 16. bis 18. Jahrhundert. Eine Ausstellung des Landes Baden-Württemberg veranstaltet vom Badischen Landesmuseum Karlsruhe: 1990. 379 S.
- [45] Zarębska T. *Teoria urbanistyki włoskiej XV i XVI wieku*. Warszawa: 1971, 171 s.
- [46] Bevz M., Okonchenko O., Okonchenko I. *Hrafichna rekonstruktsiya mista Zhovkvy stanom na XVII–XVIII st. Plan ta kartoskhema*. L'viv: “Tsentr Yevropy”, 2003. – S. 1–2.
- [47] Mykola Bevz. *Shovkva e Brody – «citta`ideali» del Tardo Rinascimento. La realizzazione ucraina dell'idea concettuale dal trattato di Pietro Cataneo*, Fondazione Romualdo Del Bianco News from Florence. – Florence, 2003. N. 5, May. P. 21–22.
- [48] *Archiv Naukovo-doslidnoho instytutu teorii ta istorii architektury*. Misto Zhovkva. Bez inv. N. Kyiv (2005).
- [49] <https://polona.pl/item/zolkiew-Mann/> 11.10.2018.
- [50] <https://polona.pl/item/zolkiew-photo/> 11.10.2018.

# Cement Concrete Mixture Performance Characterization

Maxwell L. Chisala

*The Polytechnic, Civil Engineering Department, Private Bag 303, Chichiri, Blantyre, Malawi  
e-mail: mchisala@poly.ac.mw*

**Abstract:** The cementitious composite nature of concrete makes very difficult directly ascertaining each mixture-factors' contribution to a given concrete mixture performance characteristics but also doubly difficult to accurately balance mutually exclusive requirements for performance (workability, strength, durability) and sustainability (the economic and efficient use of materials) for mixture proportioning based on recipes of previously produced concretes. This study sought to quantify individual mixture-factors' contribution to a given concrete mixture's performance characteristics. Proposed multi-parametric exponential mixture-response models were fitted to available test-performance data sets of HPC mixtures proportioned based on the best combined grade aggregate (minimum void) to generate mixture-strength and mixture-porosity development (age-mixture response relationships) profiles of HPC mixtures and deemed robust enough to yield reliable determination of mixture-response rate-parameters  $S_o$ ,  $S_p$ ,  $S_i$  and  $P_o$ ,  $P_p$ ,  $P_i$  as functions of mixture-factors that permitted reliable quantification of contributions to HPC mixture performance of individual mixture-factors and optimization of mixture properties under study over the study domain. Mixture-response sensitivity analysis models (or mixture response trace plots) to allow construction of mixture-factor envelopes and ultimately optimized mixture-response models to facilitate selection of optimal mixture-factors and optimal tailoring of HPC mixture requirements to HPC mixture performance were developed and used to obtain optimized adapted HPC mixtures from available high performance concrete (HPC) mixture design recipes investigated in the study over the study domain. Adapted HPC mixture design recipes yielded alternative mixture compositions with improved performance and efficiency characteristics with statistical performance metrics MAPE, NMBE and RMSE values of 7.6%, -3.7% and 6.5 MPa, respectively.

**Keywords:** response models, mixture-design, mixture-factors, mixture-strength, mixture-porosity, physical properties.

## List of Abbreviations

The following symbols are used in this paper:

$N$  – the total number of mixtures,

$S_{ref}$  – mixture-strength response of a known reference mixture,

$S_{target}$  – mixture-strength targeted optimized response of a mixture,

$P_{ref}$  – mixture-porosity response of a known reference mixture,

$P_{target}$  – mixture-porosity targeted optimized response of a mixture,

$R_i$  – linearly weighted summated response function of mixture,

$r_i$  – individual normalized response function of a mixture,

$T$  – the target value for the response functions facilitates the determination of values of the weights,

- $f_i(a)$  – maxima (or minima) of response trace-plot function,  
 $f_{ref}(a)$  – maxima (or minima) of response trace-plot function for a reference mixture,  
 $w_i$  – the weight for individual normalized response function of a mixture,  
 $w_i^{UB}$  – upper bound weight-value for individual normalized response function  $i$ ,  
 $w_i^{LB}$  – lower bound weight-value for individual normalized response function  $i$ ,  
 $\pi_i^{UB}$  – upper bound mixture-factor value  $i$ ,  
 $\pi_i^{LB}$  – lower bound mixture-factor value  $i$ ,  
 $\sigma$  – envelope standard deviation,  
 $\alpha_{cement}$  – packing density of cement,  
 $\alpha_{sand}$  – packing density of sand,  
 $\alpha_{RHA}$  – packing density of RHA,  
 $\alpha_{silica-fume}$  – packing density of silica-fume.

## 1. Introduction

### 1.1. High Performance Concretes

The American Concrete Institute [1] defines high performance concrete (HPC) as concrete meeting special combinations of performance, durability and uniformity requirements that cannot always be achieved customarily using conventional constituents and production practices. It is basically constituted of the same materials as conventional (normal) concrete but also incorporates supplementary cementitious materials (SCM) and high-performance admixtures to obtain cold-cast HPC mixtures with the desired performance indicators. This family of cement concretes comprises of (on the basis of mixture-strength), high-strength ( $\geq 50$ -90 MPa), very high-strength ( $\geq 90$ -130 MPa) and ultra-high-strength ( $\geq 130$ -200 MPa) concrete (modified from Büyüköztürk et al [2]).

Normal strength concrete structures have a mass to strength ratio of 40-120 kg/MNm while that for HPC structures averages 15 kg/MNm [3] but HPC mixtures have the disadvantage of high and expensive contents of cement and additives and hence the dominant HPC products on the market are almost exclusively pre-packaged, proprietary and expensive with patented aggregate and concrete formulation (information on their compositions not readily available) and almost impossible to modify or customize or adapt for alternative mixture designs for a specific individual design, construction or architectural description.

Currently, many HPC mixtures are proportioned based on prior history of production (historical information or experience) or the cost-prohibitive trial mixtures (trial-and-error) or by prescribing the limits (maximum or minimum) on the mixture-factors that circumscribe the desired performance indicators but rarely based on the actual needs of the mixture and the locally available materials and do not often involve properly balancing mutually exclusive requirements for performance (workability, strength, durability) and sustainability (the economic and efficient use of materials) [4, 5]. Most prescription-based design studies reported in the literature have not yielded expected end results because they tended to deliberately promote oversized mixtures by using cement content as a safety factor [6] while the trial-and-error modification of existing HPC recipes although very popular for HPC mixture design in the HPC production sector is a hit-or-miss affair, expensive, wasteful and un-optimizable because of the many varied material-inputs involved and the different sources for the material-inputs [7, 8]. Effective promotion of green concrete incorporating mineral additives is required in order to minimize the environment threat due to waste disposal from mineral additives and reduce cement consumption.

## 1.2. Cement Concrete Mixture Matrix Structure

Nearly a century after Abrams [9] proposed the water-to-binder ratio law, much has been contributed by cement concrete mixture researchers to broaden the understanding of how the fresh and hardened-state properties of concrete are controlled by the relative proportions of concrete constituent components—cement, coarse and fine aggregates, water, and various additives—while elevating concrete to the status of the most dominant construction material for 21<sup>st</sup> century infrastructural needs. Important advances in admixture technology over the past decades and a recognition that coarse aggregates represent the weakest link in concrete and that they can be taken out to have only sand as the main aggregate (Fig. 1) have led to the development of a new generation of cement concrete mixtures with low water-binder ratio, low matrix porosity and high particle packing density that lead to far improved rheological, mechanical and durability (extended service lifetime) properties than obtains with conventional cement concretes (CCC) of similar unit weight [10]. Such cement concrete mixtures (collectively termed as high-performance concretes or engineered ‘high-tech’ concretes designed to meet project-specific needs) incorporate fine-grained additives (fga) also known as supplementary cementitious materials (SCMs) and high-range water reducers (see Fig. 1). The incorporation of fine-grained additives produces a wide and continuous grain size distribution that helps in optimizing packing density of the matrix, creates a more uniform stress distribution when the matrix is loaded and hence a strong matrix; the smaller grains serve as a lubricant that reduces the inter-particle friction and hence improved workability of the mixture; the fine-grains also lower the porosity of the system by filling the voids of the mixture with fine particles while expelling water from the voids to allow the water to be more homogeneously distributed in the system and hence, again, improve the workability of the mixture and produce a strong mixture matrix; the super-plasticizer helps disperse cement and filler particles, improve the lubrication and reduce the inter-particle friction and improve the workability of the mixture [10].

Nevertheless, predicting common time-dependent mechanical behaviours of cement concretes remains inherently complex because of the heterogeneous nature of cement concrete, forcing concrete practitioners (engineers, concrete producers and researchers) to rely heavily on prior history of production (historical information or experience) and/or the cost-prohibitive trial mixtures (trial-and-error).

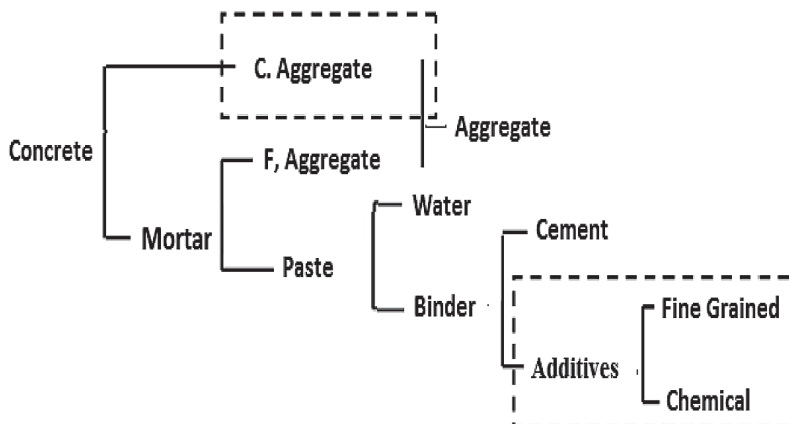


Fig. 1. Cement Concrete Mixture Matrix Structure



### 1.3. Cement Concrete Mixture Performance Characterization

Non-optimized (under-designed or over-designed) HPC mixtures are almost always uneconomical and inefficient [11, 12]. Efficient HPC mixtures with cement content balanced to achieve the desired performance while minimizing the risk of problems arising from high cement content (such as the obvious increased cost, the negative environmental effects [13], shrinkage and cracking problems) and reduced resource requirements in infrastructural applications can only be achieved with optimization of HPC mixtures on a quantitative basis [14]. The traditional method for optimizing HPC mixtures to achieve the desired performance, involving systematically varying individual mixture-factors in small increments and studying the resultant effect, is time-consuming, requiring multi-trial batches and hence expensive and inefficient. In the traditional method, the basis for selecting SCM dosage is often arbitrary and often focuses on a specific set of requirements such as strength or durability but as the demand for large volumes of concrete and faster speeds of construction grows and budgets grow tighter, greater attention is beginning to be paid in designing mixtures that are more efficient in their usage of materials without compromising engineering performance through optimisation of mixtures that makes it easy to take full advantage of the wide range of material and construction combinations and options not obtainable under non-optimized, high-energy and resource-consuming HPC mixtures. Optimized design of HPC mixtures involves consideration of more varied material constituents (and potentially more interactions among the material constituents), all optimized to determine the most economical and practical mixture-material constituent quantities to produce concrete of desired fresh-state properties (workability, pumpability, finishability, and consistency) and required hardened state properties (strength and durability-related properties such as water-tightness, wear and sulphate resistance, etc) consistent with particular conditions of use. Current mixture design of HPC production focuses on optimizing mixture properties (workability, strength and durability) of concrete in fresh and hardened states by optimizing the particle packing density of the granular ingredients of HPC as the accepted key mixture design consideration although the most common industry practice is to simply modify, by trial and error, existing HPC mixture recipes [12, 15, 16]. Sabir [17] has defined HPCs as cement concrete mixtures in which each granular ingredient performs effectively to contribute towards the HPC mixture's fresh and hardened state properties. The focus of this work is the quantification of the contribution of each HPC mixture-factor towards an HPC mixture's fresh and hardened state properties and the optimization of these contributions to allow optimal tailoring of HPC mixture requirements to HPC mixture performance to achieve efficiency and economy in HPC mixture design using cold-cast HPC mixture test-performance data sets available in cement concrete mixture research literature but also to allow modification or customization of available high performance concrete (HPC) formulations to meet specific infrastructural applications.

## 2. Methods

### 2.1. Parameterized Mixture-Strength and Mixture-Porosity Response Models

One-hundred thirty-four (134) sets of test-data and test-results for HPC mixtures from available cement concrete mixture research literature were employed to construct parameterized mixture-strength and mixture-porosity response models following the determination of model rate-parameters  $S_o$ ,  $S_p$ ,  $S_i$  and  $P_o$ ,  $P_p$ ,  $P_i$ . Cement concrete mixture-composition

optimization models were then built using the developed parameterized mixture-strength and mixture-porosity response models and constructed mixture-factor envelopes.

## 2.2. Proposed Parameterized Mixture-Strength and Mixture-Porosity Response Models

Porosity and compressive strength of cement concrete mixtures are interconnected and directly influence the failure behaviour of cement concretes. The time-dependent mechanical behaviour of concrete mixtures are characterized by an inner interval with early accelerated responses and a later outer interval with responses stabilized to a constant rate of increase which suggests a multiple-time scale problem and amenable to matching-approximations analysis [18]. The following uniform composite approximations are offered for the general response models for estimating concrete mixture-strength response  $S_t$  and concrete mixture-porosity response  $P_t$  after  $t$  days of curing:

$$S_t = [S_o + S_p t][1 - e^{-(S_i/S_o)t}]$$

$$P_t = [P_o - P_p t]/[1 - e^{-(P_i/P_o)t^{1/2}}]$$

where:  $S_o$ ,  $S_p$ ,  $S_i$  and  $P_o$ ,  $P_p$ ,  $P_i$  are mixture-strength and mixture-porosity response rate-parameters, respectively, that are functions of mixture-factors of the cement concrete mixture-matrix structure properties (see Fig. 1).

The proposed mixture-response models only require a determinations of the rate-parameters  $S_o$ ,  $S_p$ ,  $S_i$  and  $P_o$ ,  $P_p$ ,  $P_i$  from available test data or their evaluation through response prediction models based mixture-factors screened from the cement concrete mixture-matrix structure properties.

## 2.3 Proposed Mixture-Response Rate-Parameter Models

The aggregative effect of the enormous number of cement concrete mixture-constituents and properties contributing to the mixture-strength and mixture-porosity (and other desired concrete attributes) can be captured through the three rate-parameters as follows:

$$S_o = \prod_{j=1}^m \pi_j^{\alpha_{oj}}; \quad S_p = \prod_{j=1}^m \pi_j^{\alpha_{pj}}; \quad S_i = \prod_{j=1}^m \pi_j^{\alpha_{ij}}$$

$$P_o = \prod_{j=1}^m \pi_j^{\beta_{oj}}; \quad P_p = \prod_{j=1}^m \pi_j^{\beta_{pj}}; \quad P_i = \prod_{j=1}^m \pi_j^{\beta_{ij}}$$

where  $m$  is the number of independent parameterized mixture variables considered,  $\pi_j$  is the  $j^{\text{th}}$  independent parameterized mixture variable;  $\alpha_{oj}$ ,  $\alpha_{pj}$ ,  $\alpha_{ij}$  and  $\beta_{oj}$ ,  $\beta_{pj}$ ,  $\beta_{ij}$  are the exponents to be determined for strength and porosity responses, respectively, through regression analysis. Independent parameterized mixture variables screened from the cement concrete mixture-matrix structure (see Fig. 1) include:

$$\pi_1 \text{ RHA surface area factor, } \frac{100 + \% \text{ rhas}_A}{100}$$

$$\pi_2 \text{ water content factor, kg/cu. m}$$

$$\pi_3 \text{ cement content factor, kg/cu. m}$$

- $\pi_4$  silica-fume factor,  $\frac{100 + \%sf}{100}$
- $\pi_5$  fga factor,  $\frac{100 + \% fga/[w/b + 1]}{100}$
- $\pi_6$  super-plasticizer content factor, kg/cu. m
- $\pi_7$  coarse aggregate-to-binder ratio
- $\pi_8$  water-to-binder ratio factor,  $\frac{w}{b}$
- $\pi_9$  entrapped air factor,  $\frac{100 + \% \text{ Entrapped Air}}{100}$
- $\pi_{10}$  mixture-slump factor, mm
- $\pi_{11}$  sand percentage in the mixture-aggregate, %
- $\pi_{12}$  sand packing factor,  $\frac{\alpha_{\text{cement}} + \alpha_{\text{sand}}}{\alpha_{\text{cement}}}$
- $\pi_{13}$  RHA packing factor,  $\frac{\alpha_{\text{cement}} + \alpha_{\text{RHA}}}{\alpha_{\text{cement}}}$
- $\pi_{14}$  silica-fume packing factor,  $\frac{\alpha_{\text{cement}} + \alpha_{\text{SF}}}{\alpha_{\text{cement}}}$

## 2.4. Mixture-Response Model Calibrations

HPC mixture test-data from tests by Azizinamini [19], Domone and Soutsos [20] and Nguyen [21] were used to calibrate the proposed models. MATLAB®'s non-linear least-squares (nlinfit) regression analysis and MICROSOFT EXCEL®'s linear least squares (linest) regression analysis programmes were employed to fit concrete test-data to the proposed parameterized mixture-strength and mixture-porosity response models and to perform rate-parametric analyses to obtain model coefficients, respectively, as follows:

Mixture-Strength Response Rate-Parameters

$$S_o = \pi_1^{0.06} \pi_2^{0.11} \pi_3^{0.77} \pi_4^{1.81} \pi_5^{0.39} \pi_6^{0.00} \pi_7^{1.06} \pi_8^{-0.61} \pi_9^{-3.28} \pi_{10}^{0.29} \pi_{11}^{0.23}$$

$$S_p = \pi_1^{-0.03} \pi_2^{-0.51} \pi_3^{-1.16} \pi_4^{-4.48} \pi_5^{2.56} \pi_6^{-0.03} \pi_7^{-2.06} \pi_8^{-1.55} \pi_9^{3.91} \pi_{10}^{-1.49} \pi_{11}^{1.32}$$

$$S_i = \pi_1^{0.02} \pi_2^{0.41} \pi_3^{-0.23} \pi_4^{-2.85} \pi_5^{0.43} \pi_6^{-0.02} \pi_7^{0.86} \pi_8^{-2.06} \pi_9^{2.15} \pi_{10}^{-0.79} \pi_{11}^{1.27}$$

Mixture-Porosity Response Rate-Parameters

$$P_o = \pi_3^{0.76} \pi_4^{-1.33} \pi_6^{-4.87} \pi_8^{-0.04} \pi_{11}^{0.01} \pi_{12}^{-0.32} \pi_{13}^{1.03} \pi_{14}^{1.48}$$

$$P_p = \pi_3^{28.7} \pi_4^{-29.5} \pi_6^{-31.1} \pi_8^{13.9} \pi_{11}^{-3.66} \pi_{12}^{-31.1} \pi_{13}^{12.2} \pi_{14}^{25.9}$$

$$P_i = \pi_3^{2.11} \pi_4^{-2.75} \pi_6^{-11.9} \pi_8^{-0.03} \pi_{11}^{0.14} \pi_{12}^{-2.26} \pi_{13}^{1.47} \pi_{14}^{1.7}$$

Predicted results using the developed parameterized mixture-strength response and mixture-porosity response models and those predicted by mixture-strength response models proposed by Sarkar et al. [22] and Rajasekaran [23] are shown in Table 1, Table 2, Table 3 and Table 4.

Table 1. Mixture-data, test- and model-results for high strength HPC mixtures

Source	Mixture ID	$\frac{w}{b}$	c. aggr. kg/cu. m	water kg/cu. m	cement kg/cu. m	fa kg/cu. m	sf kg/cu. m	Sp kg/cu.m	Entra-ined Air %	slump mm	*Test Result MPa	Model Result MPa
	MS1‡	0.228	655.6	137.9	484.4	85.7	33.9	15.1	2.3	260	68.3	76.6
	MS3‡	0.241	623.6	163.0	550.2	87.0	38.6	10.1	1.5	267	64.1	71.9
	MS13‡	0.282	625.9	150.5	449.8	52.9	31.4	13.4	7.0	267	66.0	59.2
	MS12‡	0.248	596.9	170.3	537.9	85.1	64.7	10.3	2.1	279	71.7	69.9
	T1	0.357	685.9	155.1	328.5	82.2	23.1	2.7	5.4	89	51.4	56.4
	T3	0.265	668.1	130.1	382.6	82.1	26.6	7.4	7.4	267	67.1	63.6
	T4	0.269	747.0	112.5	338.8	56.4	23.9	6.3	4.5	222	70.7	74.6
	T5‡	0.359	680.5	169.6	390.2	55.7	27.1	3.0	2.2	152	58.2	57.3
	T6	0.294	697.1	134.0	360.7	69.5	25.5	4.8	5.4	140	64.8	62.2
	T7‡	0.400	709.0	163.0	329.6	54.9	23.3	2.5	3.5	140	50.4	53.6
	T8	0.309	686.4	138.8	355.3	68.4	25.1	4.8	6.4	178	60.7	58.5
	T10‡	0.280	675.8	116.3	314.9	78.8	22.2	6.2	10.3	235	58.1	58.2
	T11‡	0.364	646.7	178.8	382.1	82.1	26.5	3.1	5.1	114	51.4	51.5
Aziznamini [19]	T12	0.301	666.9	131.2	345.1	66.4	24.4	4.6	8.5	229	61.4	57.0
	T14‡	0.293	723.8	139.1	374.6	72.1	28.0	5.0	6.7	216	66.2	63.5
	T15‡	0.300	650.9	133.3	341.9	79.1	24.1	4.7	10.0	229	55.6	54.1
	T17	0.317	716.7	135.5	333.9	69.6	23.6	4.5	5.1	191	59.8	61.3
	T18	0.345	672.8	154.0	353.4	68.1	25.0	2.8	6.6	165	52.7	53.0
	MS2	0.229	656.8	144.1	485.7	85.9	58.1	9.4	1.8	267	83.8	79.9
	MS4	0.233	677.5	134.9	486.9	57.3	34.1	8.7	2.7	229	82.6	76.7
	MS5	0.231	644.3	147.9	518.2	72.0	49.2	12.8	1.9	267	77.6	77.3
	MS6	0.229	644.9	147.0	546.5	57.4	38.3	16.1	NR	254	71.4	-
	MS7	0.226	662.7	136.7	488.2	57.4	58.4	15.1	2.5	267	88.0	81.4
	MS8	0.223	631.3	151.1	551.9	58.0	66.4	10.1	1.9	241	84.1	78.2
	MS9	0.219	606.4	152.9	546.8	86.5	65.7	17.5	2.8	267	83.9	75.2
	MS10	0.234	640.8	148.6	515.5	71.7	47.8	12.7	2.3	267	81.5	75.0
	MS11	0.232	620.6	154.4	542.5	57.0	65.3	16.6	2.3	267	80.6	73.9
	MS14	0.229	662.7	138.2	488.5	57.4	58.5	9.1	2.3	229	86.9	78.5
	MS15	0.212	653.8	137.6	525.8	73.1	50.0	13.0	2.3	229	83.6	82.3
	MS16	0.221	655.0	144.4	555.1	58.3	38.9	9.8	2.3	254	88.1	78.8

Table 1. (continued)

Source	Mixture ID	$\frac{w}{b}$	c. aggr. kg/cu. m	water kg/cu. m	Cement kg/cu. m	fa kg/cu. m	Sf kg/cu. m	sp kg/cu. m	Entra-ined Air %	slump mm	*Test Result MPa	Model Result MPa
	MS17	0.211	630.7	142.7	551.2	87.2	38.6	16.9	2.3	267	78.5	77.6
	MS18	0.242	658.0	146.7	486.5	86.1	34.0	9.1	2.3	254	81.6	73.7
	MS19	0.233	627.7	144.2	476.8	84.4	57.1	15.5	2.3	267	76.5	72.1
	MS20	0.206	655.6	134.0	527.6	73.3	50.1	13.0	2.3	254	78.9	83.0
	MS21	0.224	642.0	145.1	512.0	87.5	49.8	13.2	2.3	248	79.5	76.6
	MS22	0.206	650.3	133.7	523.0	77.9	49.7	9.8	2.3	254	84.5	83.1
	MS23	0.238	661.5	144.3	488.2	71.9	46.6	12.1	2.3	254	79.4	77.0
	MS24	0.230	639.6	146.1	514.7	71.6	48.9	15.9	2.3	248	78.4	74.5
	MS25	0.216	641.4	138.2	519.6	71.7	49.0	12.7	2.3	254	83.4	78.9
	MS26	0.221	655.6	138.2	519.4	57.7	49.4	12.5	NR	229	84.8	-
	MS27	0.225	651.4	140.7	516.4	71.8	36.1	12.5	2.3	254	84.6	77.0
	MS28	0.223	630.1	150.3	550.6	72.5	52.2	13.5	2.3	254	76.9	76.5
	MS29	0.244	632.5	158.4	516.1	71.7	61.9	13.0	2.3	254	84.4	72.9
	MS30	0.214	651.4	138.2	523.9	72.9	49.8	12.9	2.3	229	89.0	79.6
	T2‡	0.306	706.6	141.3	365.7	70.4	25.8	4.9	2.3	152	67.9	63.3
	T6	0.294	697.1	134.0	360.7	69.5	25.5	4.8	2.3	140	64.8	62.2
	T9	0.264	709.0	126.4	394.7	56.3	27.4	7.2	2.3	229	75.2	71.7
	T13	0.276	686.4	135.5	393.4	70.3	27.3	5.2	2.3	171	71.8	64.7
	T16	0.302	711.4	138.4	363.3	70.0	25.7	6.9	2.3	203	76.5	64.3
	T19	0.267	712.6	124.2	368.9	71.0	26.0	5.0	2.3	114	76.3	70.2
	T20	0.289	716.7	129.2	365.6	56.2	25.8	4.8	2.3	203	70.2	68.1

Note: 1.0 lb/cu. yd = 0.5933 kg/m<sup>3</sup> 1.0 in = 25.4 mm

1.0 psi = 0.006895 N/mm<sup>2</sup> 1.0 oz/cu. yd = 0.03708 kg/m<sup>3</sup>

‡ mixture used in constructing rate-parameter model sand content in aggregate: 54.5% w/b: water-to-binder ratio

c. aggr: coarse-aggregate fa: fly-ash sf: silica-fume sp: super-plasticizer NR:

Not Recorded \*28-day mix-compressive strength



Table 2. Mixture-data, test- and model-results for higher strength HPC mixtures

Source	Mixture ID	w/b	binder kg/cu. m	water kg/cu. m	†% cement	†% fa	†% sf	†% ggbs	†% sp	slump mm	*Test Result MPa	Model Result MPa	SAJ Model Result MPa	SLNN Model Result MPa
Domone and Soutsos [20]	H2‡	0.32	454	145.3	100				0.80		90.0	91.0		
	K4	0.32	454	143.5	95		5		0.89		94.5	95.3	90.1	113.5
	K5	0.32	454	143.5	90		10		0.97		106.0	99.3	91.3	117.3
	K6‡	0.32	454	143.5	85		15		1.05		107.5	102.7	95.0	120.0
	K7	0.29	492	142.7	95		5		1.08		99.5	99.2	95.1	119.0
	K8	0.29	492	142.7	90		10		1.08		114.5	103.4	96.5	122.4
	K9	0.29	492	142.7	85		15		1.08		118.5	107.2	100.3	124.5
	K10	0.26	510	132.6	95		5		1.32		110.0	104.6	100.2	122.1
	K11	0.26	510	132.6	90		10		1.22		113.5	109.2	101.7	124.5
	K12	0.26	510	132.6	85		15		1.12		115.0	113.4	105.7	125.5
	K13‡	0.23	547	125.8	95		5		1.67		111.5	110.5	105.4	128.3
	K14	0.23	547	125.8	90		10		1.67	150	116.0	115.6	107.3	132.2
	K15‡	0.23	547	125.8	85		15		1.67		125.0	120.2	111.8	134.8
	H3	0.29	492	142.7	100				1.50		96.5	94.3		119.2
	H4	0.26	510	132.6	100				2.33		110.0	99.6		128.6
	H5‡	0.23	547	125.8	100				0.46		106.5	105.1		109.5
	L3‡	0.26	510	132.6	38		5	57	0.63		93.5	96.2		
	L4	0.26	510	132.6	36		10	54	1.22		94.0	96.1		
	L5‡	0.26	510	132.6	54	36	10		1.22		90.0	110.0		
	L6‡	0.20	590	118.0	90		10		2.22		118.0	123.4	113.2	141.1
	L7‡	0.20	590	118.0	40		10	50	2.22		113.5	116.5		
	L8‡	0.20	590	118.0	60		10	30	2.22		115.0	129.4		
	L9	0.20	590	118.0	60	30	10		2.22		103.5	116.5		
	I8‡	0.26	510	132.6	80	20			0.80		94.0	108.3		
	J4‡	0.32	454	145.3	90		10		0.50		90.0	95.3	90.1	112.1
	J7	0.26	510	132.6	90		10		0.97		105.0	104.9	95.1	121.5
	J8‡	0.26	510	132.6	70		30		0.74		105.0	109.5	101.7	119.2

Note: 1.0 lb/cu. yd = 0.5933 kg/m<sup>3</sup> 1.0 in = 25.4 mm 1.0 psi = 0.006895 N/mm<sup>3</sup> 1.0 oz/cu.

yd = 0.03708 kg/m<sup>3</sup> coarse aggregate = 1115 kg/m<sup>3</sup>

fine aggregate (sand) = 670 kg/m<sup>3</sup> ‡mixture used in constructing rate-parameter model SAJ:

Sarkar et. al [22] SLNN Rajasekaran [23]

w/b: water-to-binder ratio c. aggr: coarse-aggregate fa: fly-ash sf: silica-fume ggbs: ground-granulated blast-furnance slag sp: super-plasticizer sand content in aggregate: 37.5% †%: as a percentage of binder \*28-day mix-compressive strength

Table 3. Mixture-data, test- and model-results for ultra-high strength HPC mixtures

Source	Mixture ID	$\frac{w}{b}$	binder kg/cu. m	water kg/cu. m	cement kg/cu. m	††%rha	††%sf	†%sp	slump mm	*Test Result MPa	Model Result MPa
	‡SF20		1062	159.3	885		20	0.76		168	169
	SF15RHA5	0.18	1062	159.3	885	5	15	1.15	210-230	174	170
	SF10RHA10		1062	159.3	885	10	10	1.15		184	168
	SF5RHA15		1062	159.3	885	15	5	1.15		176	165
	‡RHA20(3.6)		1062	159.3	885	20		1.15		176	162
	RHA20(5.6)		1062	159.3	885	20		1.75		132	163
	‡RHA20(6.3)		1062	159.3	885	20		1.20		156	162
	RHA20(9.0)		1062	159.3	885	20		1.15		174	162
	RHA20(5.6)		1062	159.3	885	20		0.89		180	162
Nguyen [21]	‡REF		1140	205.3	1140			0.90		162	155
	‡SF20		1062	159.3	885		20	0.76		164	169
	‡REF		1140	205.2	1140			0.90		163	155
	RHA10(5.6)		1110	200.0	1110	10		1.15		170	165
	SF10		1110	181.8	885		10	0.76		163	165
	SF20		1062	191.2	885		20	0.76		164	169
	‡RHA20(5.6)		1062	137.7	885	20		1.15		174	164
	SF30		995	191.2	765		30	0.76		142	168
	‡SF10		1110	137.7	1010		10	0.76		170	164
	SF10RHA10(5.6)		1062	181.8	885	10	10	1.15		185	167
	SF10RHA20(5.6)		995	137.7	765	20	10	1.15		166	161
	‡SF10RHA30(5.6)		903	116.1	645	30	10	1.15		154	151

Note:SF(A)RHA(B)(C): A: %sf B: %rha C: rha grain size 1.0 lb/cu. yd = 0.5933 kg/m<sup>3</sup> 1.0 in = 25.4 mm 1.0 psi = 0.006895N/mm<sup>2</sup>

1.0 oz/cu. yd = 0.03708 kg/m<sup>3</sup> ‡mixture used in constructing rate-parameter model

rha surface area  $\approx$  3x(sf surface area)  $\approx$  62x(cement surface area) w/b: water-to-binder ratio rha: rice-husk ash sf: silica-fume sp: super-plasticizer sand content in aggregate: 100% †%: as a percentage of binder ††%: as a percentage of cement \*28-day mix-compressive strength

Table 4. Mixture-Data, Test- and Parameterized Mixture-Porosity Model-Results for Ultra-High Strength HPC Mixtures

Source	Mixture ID	Sand%	†%w/b	Cement				†Packing Density, $\alpha$				‡Test Result %	Model Result %	
				kg/cu. m	†%sf	†%sp	†%RHA	Cement	Sand	RHA	SF			
	REF	100	18.0	1140.0	0.0	0.9	0.0	0.399				7.5	8.67	
	RHA20	100	18.0	885.0	0.0	1.15	20.0	0.399	0.478	0.364		5.76	5.87	
	SF20	100	18.0	885.0	20.0	0.76	0.0	0.399				0.64	4.55	4.56
	S4	0	25.0	1140.0	0.0	0.8	0.0	0.399					10.61	9.18
	S5	0	25.0	1076.3	0.0	0.8	5.0	0.399					10.87	8.90
	S6	0	25.0	1012.5	0.0	0.8	10.0	0.399					11.68	8.91
	S7	0	25.0	885.0	0.0	0.8	20.0	0.399	0.364			8.95	8.99	
Nguyen [21]	S8	0	25.0	1076.3	5.0	0.8	0.0	0.399					7.52	6.86
	S9	0	25.0	1012.5	10.0	0.8	0.0	0.399					6.23	5.22
	S10	0	25.0	885.0	20.0	0.8	0.0	0.399					4.53	2.94
	S11	0	40.0	1140.0	0.0	0.8	0.0	0.399					17.46	16.98
	S12	0	40.0	1076.3	0.0	0.8	5.0	0.399					16.18	18.88
	S13	0	40.0	1012.5	0.0	0.8	10.0	0.399					16.7	18.92
	S14	0	40.0	885.0	0.0	0.8	20.0	0.399					20.93	19.13
	S15	0	40.0	1076.3	5.0	0.8	0.0	0.399				0.64	13.27	14.81
	S16	0	40.0	1012.5	10.0	0.8	0.0	0.399					12.91	11.53
	S17	0	40.0	885.0	20.0	0.8	0.0	0.399					13.26	6.81

†Packing density,  $\alpha$  (based on LPM—Linear Packing Model [24]) ‡Total porosity of samples measured by mercury intrusion porosimetry (MIP) at 28 days [24]

## 2.5. Proposed Parameterized Mixture Optimization Algorithm

Using the developed parameterized mixture-strength and mixture-porosity response models and an optimization scheme based on a linearly weighted least-squares algorithm, mixture optimization models were constructed for mixtures investigated in the study as follows:

Defining a linearly weighted summated mixture response (WSMR) function

$$R_i = \sum_{j=1,1}^N w_j \bar{R}_{ji}$$

with individual normalized mixture response functions

$$\bar{R}_i = \frac{1}{N} \frac{f_i(a)}{f_{i(\text{ref})}(a)}$$

where are maxima (or minima) of mixture response trace plot (RTP) or mixture-response sensitivity analysis functions [25] shown in Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 and Fig. 5 to facilitate determination of the N mixture-factor weights, , provided and by minimizing the squared sum of deviations between the weighted-values and the target value, T

$$\sum_{i=1}^N [w_i \bar{R}_i - T]^2 \rightarrow \min.$$

Differentiating the squared sum of deviations with respect to corresponding weights, the following system of equations is obtained:

$$\begin{bmatrix} 2(\bar{R}_1)^2 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 2(\bar{R}_2)^2 & \dots & \dots & \text{symm} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 2(\bar{R}_{N-1})^2 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 2(\bar{R}_N)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ \dots \\ w_{N-1} \\ w_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2TR_1 \\ 2TR_2 \\ \dots \\ \dots \\ 2TR_{N-1} \\ 2TR_N \end{bmatrix}$$

that facilitates the determination of values of the mixture-factor weights,  $w_i$ , and their envelope standard deviation

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [w_i \bar{R}_i - T]^2}{N-1}}$$

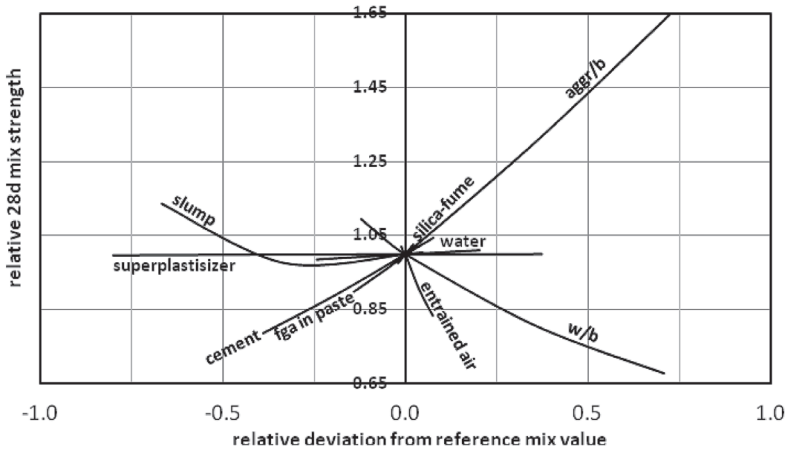


Fig. 2. Mixture-strength response trace plots of mixture M22

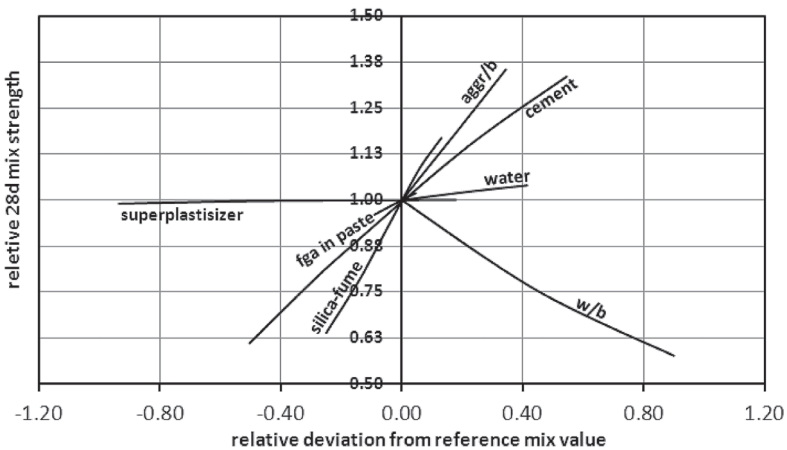


Fig. 3. Mixture-strength response trace plots of mixture L8

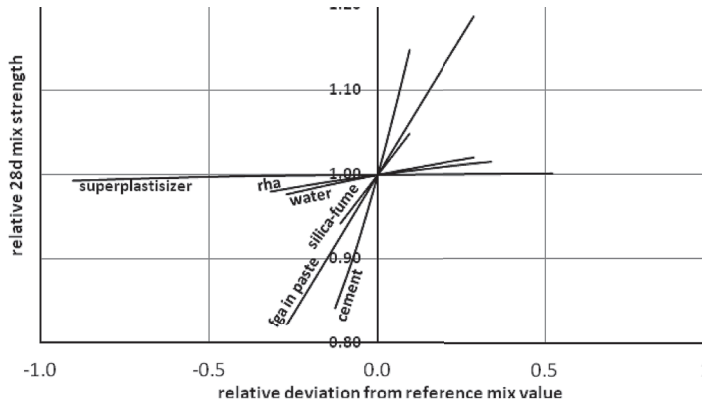


Fig. 4. Mixture-strength response trace plots of mixture RHA(5.6)

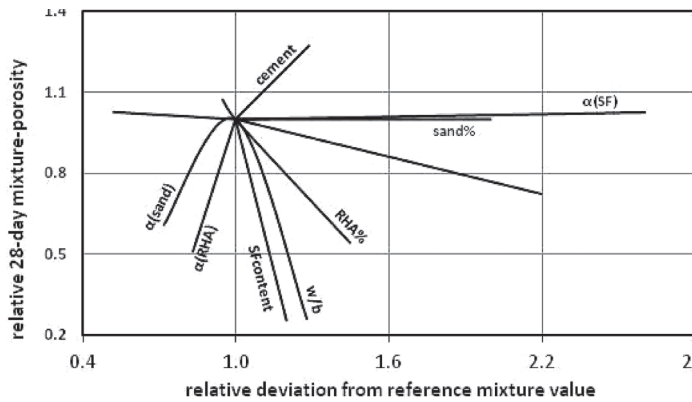


Fig. 5. Mixture-porosity response trace plots for mixture S7

The constructed mixture-factor envelopes for concrete mixtures investigated in the study are presented in Fig. 6.

The constructed mixture-factor envelopes readily yield optimized mixture-compositions and corresponding optimized mixture-responses  $S_{target}$  and  $P_{target}$  by simply interpolating between upper and lower bound values of mixture-factor weights and mixture-factor values ( for a known mixture- response  $S_{ref}$  and  $P_{ref}$  of a known concrete mixture as follows:

For optimized mixture-compressive strength responses

$$S_{target} = S_{ref} \left\{ 1 + \left\{ \left[ \frac{\pi_i - \pi_i^{LB}}{\pi_i^{UB} - \pi_i^{LB}} \right] \left| \frac{\sum_{i=1}^N |w_i^{UB} - w_i^{LB}|}{N} \right| \right\} \right\}$$

For optimized mixture-total porosity responses

$$P_{target} = P_{ref} \left\{ 1 - \left\{ \left[ \frac{\pi_i - \pi_i^{LB}}{\pi_i^{UB} - \pi_i^{LB}} \right] \left| \frac{N}{\sum_{i=1}^N |w_i^{UB} - w_i^{LB}|} \right| \right\}^3 \right\}$$

Predicted optimized mixture-compositions and corresponding optimized mixture responses are summarized in Table 5.

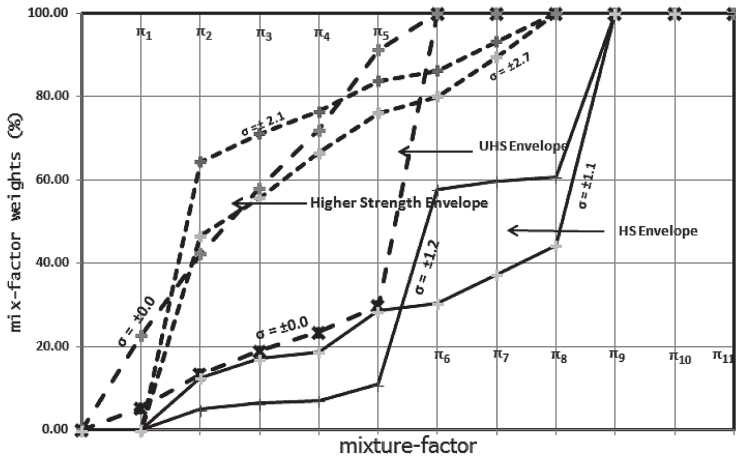


Fig. 6. Mixture-factor envelopes for studied mixture property

Table 5. Predicted optimized mixture composition and parameterized mixture-strength for HPC mixtures

Reference Mixture ID	Optimized Mixture factor	Sand %	w/b	c.aggr kg/cu. m	water kg/cu. m	Cement kg/cu. m	fa kg/cu. m	Sf kg/cu. m	sp kg/cu.m	rha kg/cu.m	Entrained Air %	slump mm	PMS Model Result MPa	MFE Model Result MPa	
MS5			0.219	647.1	150.4	541.9	82.2	62.7	15.4		1.8	267	81.3	87.1	
MS8			0.230	627.5	153.8	525.1	82.3	62.3	12.2		1.8	241	81.6	88.1	
MS18	fga	54.5	0.228	651.2	150.4	513.1	82.4	62.9	11.0		2.2	254	78.7	83.0	
T3			0.248	674.9	134.5	406.8	83.6	52.9	9.0		7.1	267	69.7	71.6	
T11			0.340	643.0	182.6	401.3	82.6	52.7	3.9		4.8	114	53.9	58.0	
T20			0.255	703.7	130.9	381.1	82.0	52.3	5.7		3.9	203	71.9	76.7	
H2			0.285	1081.8	148.1	453.5	28.6	37.8	3.3				100.0	98.9	
H4			0.245	1088.6	138.0	520.0		43.2	7.2				106.1	108.2	
K14	C. aggr	37.5	0.213	1083.3	128.7	493.4		111.6	8.3			150	122.8	125.6	
K15			0.210	1080.3	127.7	462.3		144.6	8.2				127.2	130.6	
L5			0.250	1090.1	138.5	281.7	162.9	108.2	4.6				107.6	119.5	
SF20				1140.0	171.0	950.0		190.0	8.7				183.4	190.3	
SF10	C. aggr	100.0	0.18	1140.0	186.5	1036.4		103.6	8.7			220	171.2	185.8	
RHA20(5.6)				1140.0	171.0	950.0		-	13.1	190.0				172.0	184.7
SF10RHA10(5.6)				1140.0	171.0	950.0		95.0	13.1	95.0				177.9	188.1
K15	Cement	37.5	0.203	1139.1	116.1	495.0		75.7	8.2			150	128.8	133.3	
L5	Cement		0.240	1131.0	126.5	303.0	175.2	27.5	4.7				118.1	114.8	
MS8	Cement	54.5	0.222	654.6	146.3	537.3	56.3		9.8		1.9	241	79.7	87.3	
SF10RHA10	Sf	100.0	0.18	1140.0	171.0	950.0		95.0	13.1	95.0		220	177.9	173.8	
	Sp			1140.0	171.0	950.0		95.0	13.1	95.0				177.9	178.6
	Water		0.285	650.8	134.2	366.8	78.7	25.5	7.1		7.1		59.7	66.2	
	Cement		0.244	646.1	123.0	400.4	77.7	25.2	7.0		7.0		65.7	66.5	
T3	Sf	54.5	0.252	708.2	123.0	362.7	77.8	48.0	7.0		7.0	267	72.7	68.3	
	Fa		0.263	606.4	112.5	314.9	52.9	22.2	2.5		1.5		67.8	63.6	
	Sp		0.265	671.0	129.7	381.4	81.9	26.5	9.4		7.4		62.4	67.3	



### 3. Results and Discussion

Results predicted by the proposed parameterized mixture-strength response and mixture-porosity response models are compared with mixture-test results and results of available models in Table 1, Table 2, Table 3 and Table 4. As can be observed, the proposed parameterized mixture-response models yield reasonably good results for most of the mixtures studied over the study domain (with statistical performance metrics for an unbiased estimate of the prediction ability of the models of mean absolute percentage error MAPE, normalized mean bias error NMBE and root mean square error RMSE values of 6.7%, -3.8% and 9.4MPa, respectively).

The computed mixture-factor weights and constructed mixture-factor envelopes were used to predict optimized mixture-compositions, with mixture-factors limited to the ranges in the study domain, and these were in turn used to predict optimized mixture-response(s) of interest. Optimized mixture-strength response results, presented in Table 5, indicate maximum performance of 8.7%, 12.6% and 12.6% over parent mixture-strengths of VHS, HS and UHS HPC mixtures recipes, respectively. HS concrete mixtures have the least mixture-factor envelope-area (see Fig. 6) and hence respond the least to mixture-composition optimization efforts. Optimized mixture-strength responses predicted by the mixture-factor envelope (MFE) model compare favourably with those obtained by the parameterized mixture-strength (PMS) response model (with statistical performance metrics for an unbiased estimate of the prediction ability of the models of mean absolute percentage error MAPE, normalized mean bias error NMBE and root mean square error RMSE values of 7.6%, -3.7% and 6.5MPa, respectively) and although the results for the parameterized mixture-porosity (PMP) response model are not provided, it has a lean mixture-factor envelope-area (see Fig. 6) and hence responds the least to mixture-porosity based mixture-composition optimization efforts.

The optimal values of mixture-factors for fly-ash and silica-fume yield more strength-efficient T3 mixture while optimizing UHS (high-energy and resource-consuming) HPC mixtures through graded aggregates yielded strength-efficient and cement-efficient mixtures.

HPC mixtures can be similarly optimized for workability (through the mix-slump factor) and durability (through the mix entrained-air-content factor). Attempts at modelling optimization of HPC mixture-compositions in the larger mixture-response modelling research community—even with the non-traditional advanced machine learning optimization approaches like sequential learning neural network (SLNN) or neuro-fuzzy computing techniques such as the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)—have thus far only yielded, at best, qualitative characterizations of concrete performance or mixture optimization [26, 27].

It is acknowledged that these models are derived from laboratory-test strengths and therefore their application to field cement concrete mixtures (in-situ concretes) suspect or uncertain. Experience has, however, shown that a high percentage (up to 90%) of laboratory test strengths are attainable in-situ concrete under good field practices [28]. HPCs have already moved (transitioned) from laboratory research to industrial implementations (practical applications) and already occupy a sizeable share of the market although most of these applications have been limited to proprietary blends and non-in situ construction (commercial ready mix products and pre-cast applications) and even convenience blends but are in general more expensive (by an order of upwards of twenty) than non-proprietary conventional cement concretes mainly owing to proprietary specifications of mixture proportions of non-proprietary HPC mixtures usually being based on trial and error methods than any settled material/behavioural laws or some quantitative characterization of its performance [29, 30].

## 4. Conclusions

Contributions to mixture-performance by identified mixture-factors were quantitatively determined through models developed in the study which allowed optimal tailoring of mixture requirements to mixture performance of HPCs by explicitly relating performance (user) specifications to mixture (producer) requirements and make possible optimized trade-offs between them where the three main performance specifications—strength, workability, and durability variously specified (the strength, through the desired compressive strength; workability, through the desired slump; and durability, through some given exposure condition)—can be explicitly achieved through variously specified mixture requirements (compressive strength, via some water/cement ratio; workability, via some indication of water content per unit volume of concrete; and durability, via some indication of some minimum cement content and maximum water/cement ratio). The study findings suggest the performance of a known mixture (its strength, workability, and durability) can be improved by a determinable amount and an optimized mixture-composition reliably determined through mixture-factor envelopes largely by increasing the binder content of the mixture and/or the graded aggregate content of the mixture. Developed models were reliably used to optimally modify or customize available HPC formulations to yield alternative mixture compositions with improved performance and efficiency characteristics (eliminating the cost-prohibitive need for undertaking multiple trials) with statistical performance metrics MAPE, NMBE and RMSE values of 7.6%, -3.7% and 6.5MPa, respectively.

Although the study considered only two mixture-performance parameters, compressive strength and porosity, the study approach can be applied for other mixture-performance parameters (tensile strength, shrinkage and other mixture-properties attributable to high performance concretes).

### Acknowledgements

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors. However, the author thanks The Department of Civil Engineering at The Polytechnic for the resources availed him towards the production of the manuscript and also recognize the helpful comments of several colleagues in the department.

### Statement of Competing Interests

The author has no competing interests relating to this work.

## References

- [1] American Concrete Institute. *CT-13: ACI Concrete Terminology-An ACI Standard*. (2017).
- [2] Büyüköztürk O, Lau D. *High Performance Concrete: Fundamentals and Application*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, U.S. (2002).
- [3] Schiehl P., Stengel F. *Sustainable construction with UHPC—from life cycle inventory data collection to environmental impact assessment*. In: Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany (2008) 461–468.
- [4] Lee B.Y., Kim J.H., Kim J.K. *Optimum concrete mixture proportion based on a database considering regional characteristics*. Journal of Computing in Civil Engineering 23 (2009) 258–265.

- 
- [5] Ji T., Lin T., Lin X. *A concrete mix proportion design algorithm based on artificial neural networks*. Cement and Concrete Research 36 (2006) 1399–1408.
- [6] Chamberlin, W.P. *Performance-related specifications for highway construction and rehabilitation*. NCHRP 212. Transportation Research Board, Washington, DC. (1995).
- [7] Hoang K.H., Hadl P., Nguyen V.T. *A new mix design method for UHPC based on stepwise optimization of particle packing density*. In: First International Interactive Symposium on UHPC. (2016).
- [8] Livingston R.A., Bumrongjaroen W. *Optimization of silica fume, fly ash, cement mixes for high performance concrete*. In: Proceedings of 2005 World of Coal Ash (WOCA), Lexington, Kentucky, USA. (2005) 9 pages.
- [9] Abrams D.A. *Design of concrete mixtures*. Bulletin No. 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago (1918) 309–330.
- [10] Ma J., Schneider H. *Properties of ultra-high-performance concrete*. LACER (2002) 25–32.
- [11] Lushnikova N. *Optimization of selection process of constituent materials for high performance concrete and mortars*. Budownictwo i Architektura 14(1) (2015) 53–64.
- [12] Shilstone, J.M. (Sr). *Concrete mixture optimization*. Concrete International 12(6) (1990) 33–39.
- [13] Golewski G.L. *Green concrete composite incorporating fly ash with high strength and fracture toughness*. Journal of Cleaner Production 172 (2018) 21–226.
- [14] Taylor P., Bektas F., Yurdakul E., Ceylan H. *Optimizing cementitious content in concrete mixtures for required performance*. Final Report Federal Highway Administration (DTFH61-06-H-00011 (Work Plan 20)) January 2012.
- [15] Abbas S., Nehdi M., Saleem M.A. *Ultra-high performance concrete: mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges*. International Journal of Concrete Structures and Materials 10(2) (2016) 125–142.
- [16] Caubergand N., Piérard J. *Ultra High Performance Concrete: Mix design and practical applications*. Tailor Made Concrete Structures–Walraven & Stoelhorst, (2008) 1085–1087.
- [17] Sabir, B.B. *High strength condensed silica-fume concrete*. Magazine of Concrete Research 47 (1995) 219–226.
- [18] Logan J.D. *Applied Mathematics: A Contemporary Approach*. 2nd ed., John-Wiley, New York. (2001).
- [19] Azizinamini A. *Nebraska High-Strength Concrete Research Project*. Centre for Infrastructure Research Report, University of Nebraska-Lincoln. (1990).
- [20] Domone P., Soutsos M. *Properties of high-strength concrete mixes containing PFA and GGBS*. Magazine of Concrete Research 17(3) (1995) 355–363.
- [21] Nguyen V.T. *Rice-husk ash as a mineral admixture for ultra-high performance concrete*. PhD Thesis, Delft University of Technology, (Delft, Netherland) (2011) 95–139.
- [22] Sarkar A., Adwan O., Munday I.G.L. *High strength concrete: An investigation of flexural behaviour of high strength RC beams*. The Structural Engineer. 19 (1997) 115–121.
- [23] Rajasekaran S. *Optimal mix design for high performance concretes by evolution strategies combined with neural networks*. Indian Journal of Engineering Material Science 13 (2006) 7–17.
- [24] de Larrard F., Sedran T. *Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model*. Cement and Concrete Research 24(6) (1994) 997–1009.
- [25] Simon M.J. *Concrete mixture optimization using statistical methods*. Final Report. FHWA-RD-03-060, Infrastructural Research, (2003) 167 pp.
- [26] Tesfamariam S., Najjaran H. *Adaptive network-fuzzy inferencing to estimate concrete strength using mix design*, ASCE Journal in Materials in Civil Engineering. 19 (2007) 550–560.
- [27] Taghaddos H., Mahmoudzadeh F., Pourmoghaddam A., Shekarchizadeh M. *Prediction of Compressive Strength Behaviour in RPC with applying an Adaptive Network-Based Fuzzy Interface System* In Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany September 13–15 (2004) 273–284.
- [28] Cook J.E. *Research and application of high strength concrete using Class C Fly Ash*. ACI Concrete International (1980) 72–77.

- [29] Muller H.S., Henold G., Scheydt J.C., Kubnt M. *Development and application of UHPC convenience blends*. In: Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany (2008) 69–76.
- [30] Techbrief. *Development of non-proprietary ultra-high performance concrete for use in the Highway Bridge Sector*. FHWA Publication No.: FHWA-HR (2013).

# Stosunki sił i momentów sił jako kryteria podobieństwa dynamicznego różnych zjawisk występujących w inżynierii wiatrowej, inżynierii śniegowej i dynamice płynów

## Część I – Podstawy i zagadnienia ustalone

Andrzej Flaga

Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Mechaniki Budowli, Politechnika Krakowska  
e-mail: liwpk@windlab.pl

**Streszczenie:** Praca dotyczy kryteriów podobieństwa dynamicznego różnych zjawisk występujących w inżynierii wiatrowej, inżynierii śniegowej i dynamice płynów wyprowadzonych ze stosunków sił i momentów sił wpływających na te zjawiska. Wyprowadzone i analizowane w części I kryteria podobieństwa dynamicznego dotyczą głównie następujących zagadnień ustalonych: 1. Przepływów i opływów płynów; 2. Zagadnień kontaktowych płyn – ciało stałe; 3. Zagadnień pływania ciała stałego po płynie bez i z obecnością fal powierzchniowych.

**Słowa kluczowe:** kryteria podobieństwa dynamicznego, inżynieria wiatrowa, inżynieria śniegowa, dynamika płynów, zagadnienia ustalone.

### 1. Siły występujące w zagadnieniach mechaniki płynów i ciał stałych lub cząstek materialnych

Jeżeli dwa zjawiska są dynamicznie podobne, korespondujące z nimi siły muszą być w tych samych stosunkach w obydwu podobnych przypadkach. Wektor siły  $F$  o module  $F$  może być odniesiony do różnych właściwości fizycznych płynu, ciała stałego czy cząstki materialnej.

Przez cząstki materialne rozumie się tu między innymi: rozdrobnione cząstki ciała stałego, pyły, mikrocząsteczki ciała stałego stanowiące zawiesinę, pęcherzyki powietrza w wodzie, krople wody w powietrzu, płatki śniegu w powietrzu, drobne kryształki lodu w powietrzu lub chmurze śniegowej itp.

W praktycznych zastosowaniach zagadnień interakcji płyn – ciało stałe, następujące siły, które mogą działać na element płynu ( $f$ ), ciała stałego ( $s$ ) (lub cząstki ( $p$ )), mogą być wyróżnione, używając odpowiednich indeksów lub wskaźników dolnych [1,2,3]:

- Siły ciężkości ( $g$ ) –  $F_{gf}, F_{gs}$ ;
- Siły ciśnienia ( $\Delta p$ ) –  $F_{\Delta pf}$ ;
- Siły ciśnienia powierzchniowego ( $\Delta p$ ) –  $\mathcal{F}_{\Delta p}; \mathcal{F}_{\Delta pf}, \mathcal{F}_{\Delta ps}; \mathcal{F}_{\Delta pf} = -\mathcal{F}_{\Delta ps}$ ;
- Siły lepkości ( $v$ ) –  $F_{vf}$ ;
- Siły lepkości powierzchniowej ( $v$ ) –  $\mathcal{F}_v; \mathcal{F}_{vf}, \mathcal{F}_{vs}; \mathcal{F}_{vf} = -\mathcal{F}_{vs}$ ;
- Siły chropowatości powierzchni / tarcia powierzchniowego ( $r$ ) –  $\mathcal{F}_r; \mathcal{F}_{rf}, \mathcal{F}_{rs}; \mathcal{F}_{rf} = -\mathcal{F}_{rs}$ ;
- Siły sprężystości ( $e$ ) –  $F_{ef} = F_{Kf}, F_{es}; F_{Es}, F_{Gs}$ ;

- Siły bezwładności ( $i$ ) –  $F_{if}, F_{is}, F_{ifs}$ ;
- Siły napięcia powierzchniowego ( $t$ ) –  $F_{tf}$ ;
- Siły tłumienia ( $d$ ) –  $F_{ds}$ ;
- Siły wyporu ( $b$ ) –  $\mathcal{F}_b, \mathcal{F}_{bf}, \mathcal{F}_{bs}; \mathcal{F}_{bf} = -\mathcal{F}_{bs}$ ;
- Siły oporu falowego ( $w$ ) –  $\mathcal{F}_w, \mathcal{F}_{wf}, \mathcal{F}_w; \mathcal{F}_{wf} = -\mathcal{F}_{ws}$ ;
- Siły unoszenia lub opadania ciała stałego (lub cząstek materialnych) zanurzonego w płynie –  $F_{gb} = F_{gs} - \mathcal{F}_{bs}$ .

Wymienione siły mogą być siłami powierzchniowymi – a więc powiązаныmi z odpowiednimi naprężeniami – lub siłami objętościowymi – tj. powiązаныmi z gęstościami odpowiednich sił. Zarówno jedne jak i drugie mogą dotyczyć małych elementów powierzchniowych lub objętościowych płynu i ciała stałego (cząstki), o wymiarach charakterystycznych odpowiednio  $d_f$  i  $d_s$  ( $d_p$ ), lub dużych elementów powierzchniowych lub objętościowych płynu i ciała stałego (cząstki) – np. całego ciała stałego, o wymiarach charakterystycznych odpowiednio  $D_f$  i  $D_s$  ( $D_p$ ).

Rozpatrzmy dalej wybrane zagadnienia stosowanej mechaniki płynów i ciał stałych lub cząstek materialnych, ze szczególnym zwróceniem uwagi na zagadnienia kontaktowe płyn – ciało stałe lub płyn – cząstki materialne, przy ich ruchu względnym. W rozważaniach tych założymy, że spełnione są kryteria podobieństwa geometrycznego danego zagadnienia, gdy chodzi o skalę naturalną (prototyp identyfikowany indeksem dolnym  $P$ ) i skalę modelową (model identyfikowany indeksem dolnym  $M$ , zwykle wykonany w mniejszej skali).

Interesować nas będą siły lokalne, związane z niedużymi elementami materialnymi powierzchniowymi lub objętościowymi, oraz siły globalne (wypadkowe), związane z dużymi elementami materialnymi powierzchniowymi lub objętościowymi. W tym ostatnim przypadku będziemy mówili o globalnych (wypadkowych) siłach i momentach sił. Ponieważ każda z sił lub momentów sił jest w ogólności wielkością wektorową – a więc określoną np. przez trzy składowe w kartezjańskim układzie współrzędnych  $(x, y, z)$  – dlatego też w zagadnieniach przestrzennych należy brać pod uwagę wszystkie lub wybrane składowe tych sił i momentów sił. Niektóre z zagadnień dotyczyć będą jednej z tych składowych (np. siły oporu aerodynamicznego lub hydrodynamicznego).

Większość z rozpatrywanych zagadnień, to zagadnienia ustalone, a więc takie gdy prędkość napływającego płynu  $V_f$ , prędkość charakterystyczna ciała stałego  $V_s$  (cząstki  $V_p$ ) czy też ich prędkość względna, są stałe w czasie.

W rozważaniach przyjmiemy ponadto, że spełnione są kryteria podobieństwa kinematycznego przepływu płynu na powierzchniach brzegowych zewnętrznych wyodrębnionej objętości płynu, zawierającej ciało stałe lub cząstki materialne.

Wyprowadzone i analizowane dalej kryteria podobieństwa dynamicznego dotyczyć będą głównie następujących zagadnień:

- Przepływów i opływów płynu;
- Zagadnień kontaktowych płyn – ciało stałe;
- Zagadnień pływania ciała stałego po płynie bez i z obecnością fali powierzchniowej;
- Unoszenia się i opadania ciała stałego lub cząstek materialnych w nieruchomym lub ruchomym płynie;
- Drgań ciała stałego w nieruchomym i ruchomym płynie.

Wymienione powyżej siły występujące w płynie, ciele stałym (cząstce) oraz na powierzchni kontaktowej płyn – ciało stałe (płyn – cząstki), będziemy charakteryzować przez współczynniki lub parametry (z reguły wymiarowe) występujące w zależnościach definiują-



cych te siły. Rozpatrując zagadnienie na gruncie mechaniki ośrodków ciągłych założymy, że zbiór następujących wielkości wymiarowych charakteryzuje omawiane siły:

$$\left( g; \rho_f, \rho_s, \rho_p; V_f, V_s, V_p, V_{ts}, V_{tp}, V_{wf}; d_f, d_s, d_p, D_f, D_s, D_p; \Omega_f, \Omega_s, \Omega_p; K_f; E_s, G_s; \mu_f, \mu_s, \mu_r; \Delta p_f = p_f - p_{stf}; \Delta p = p_{fs} - p_{stf}; \sigma_{tf}, A_{wf}, \lambda_{wf} \right) \quad (1)$$

gdzie:  $g$  – przyspieszenie ziemskie;  $\rho_f, \rho_s, \rho_p$  – gęstości masy płynu, ciała stałego i cząstek;  $V_f, V_s, V_p$  – charakterystyczne prędkości płynu (zwykle daleko przed ciałem stałym), ciała stałego i cząstek;  $V_{ts}, V_{tp}$  – tzw. prędkości terminalne swobodnego spadku (lub unoszenia się) ciała stałego i cząstek w płynie;  $V_{wf}$  – prędkość fali powierzchniowej płynu;  $d_f, d_s, d_p, D_f, D_s, D_p$  – wymiary charakterystyczne małego lub dużego elementu powierzchniowego lub objętościowego płynu, ciała stałego i cząstek;  $\Omega_f, \Omega_s, \Omega_p$  – objętości dużego elementu objętościowego płynu, całego ciała stałego i całej cząstki;  $K_f$  – moduł ściśliwości (sprężystości objętościowej) płynu;  $E_s, G_s$  – moduły sprężystości podłużnej (Younga) i poprzecznej (Kirchhoffa) ciała stałego;  $\mu_f$  – współczynnik lepkości dynamicznej płynu;  $\mu_s$  – współczynnik tłumienia drgań (tarcia wewnętrznego) ciała stałego;  $\mu_r$  – współczynnik tarcia powierzchniowego ciała stałego i płynu (bezwymiarowy);  $p_{fs}$  – ciśnienie na elemencie płynu lub na powierzchni brzegowej ciała stałego i płynu;  $p_{stf}$  – ciśnienie statyczne w płynie daleko przed ciałem stałym;  $\sigma_{tf}$  – współczynnik napięcia powierzchniowego płynu jeśli element płynu jest na powierzchni kontaktowej płyn – gaz;  $A_{wf}, \lambda_{wf}$  – odpowiednio amplituda i długość fali powierzchniowej płynu.

W przypadku gdy ciało stałe (cząstki) traktowane jest całościowo (tj. globalnie), odpowiednio parametry charakteryzujące siły lub momenty globalne (wypadkowe, wynikowe) sił będą doprecyzowane w trakcie dalszych rozważań.

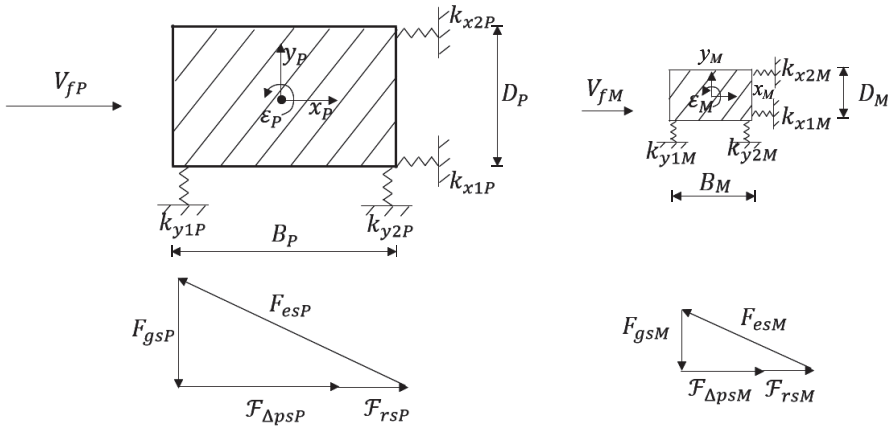
W wielu problemach kontaktowych płyn – ciało stałe niektóre z rozważanych sił albo nie występują lub są mało znaczące. Na Rys. 1 są przedstawione dwa geometrycznie podobne układy płyn – ciało stałe, tj. sprężyste podparte ciało pryzmatyczne o osi poziomej  $y$  prostopadłej do napływającego płynu o prędkości  $V_f$ . Ponadto przyjmijmy, że te dwa układy są kinematycznie podobne i że siły globalnej interakcji płyn – ciało stałe działające na ciało stałe są:  $F_{gs}, \mathcal{F}_{\Delta ps}, \mathcal{F}_{rs}$  i  $F_{es}$ . Wówczas podobieństwo dynamiczne analizowanego zagadnienia będzie osiągnięte, gdy:

$$\frac{F_{gsP}}{F_{gsM}} = \frac{\mathcal{F}_{\Delta psP}}{\mathcal{F}_{\Delta psM}} = \frac{\mathcal{F}_{rsP}}{\mathcal{F}_{rsM}} = \frac{F_{esP}}{F_{esM}} \quad (2)$$

gdzie: indeksy dolne  $P$  i  $M$  odnoszą się jak poprzednio do prototypu i modelu. Zależności te mogą być wyrażone jako:

$$\left( \frac{F_{es}}{F_{gs}} \right)_M = \left( \frac{F_{es}}{F_{gs}} \right)_P; \quad \left( \frac{F_{es}}{\mathcal{F}_{\Delta ps}} \right)_M = \left( \frac{F_{es}}{\mathcal{F}_{\Delta ps}} \right)_P; \quad \left( \frac{F_{es}}{\mathcal{F}_{rs}} \right)_M = \left( \frac{F_{es}}{\mathcal{F}_{rs}} \right)_P \quad (3)$$

Każda z tych wielkości jest bezwymiarowa, a więc jest liczbą podobieństwa. Dla czterech sił działających na ciało stałe otrzymaliśmy trzy niezależne wyrażenia, które muszą być spełnione. Gdyby były trzy siły otrzymalibyśmy dwa niezależne wyrażenia itd. Znaczenie tych bezwymiarowych stosunków będzie dyskutowane w następnych paragrafach.



Rys. 1. Prototyp (a) i model (b) o skali długości  $K_L = \frac{D_P}{D_M} = \frac{B_P}{B_M}$  i skali prędkości  $K_{V_f} = \frac{V_{fP}}{V_{fM}}$  oraz korespondujące siły

## 2. Analiza wymiarowa poszczególnych sił

Przyjmijmy trójelementową bazę wymiarową:  $(\rho, V, D)$  dla wszystkich wielkości wymiarowych zbioru (1), charakterystycznych dla poszczególnych sił, przy czym w zależności od rozpatrywanego przypadku będzie:

$$\rho = \begin{cases} \rho_f \\ \rho_s; \\ \rho_p \end{cases}; \quad V = \begin{cases} V_f \\ V_s, V_p \\ V_{ts}, V_{tp} \\ V_{wf} \end{cases}; \quad D = \begin{cases} d_f, D_f \\ d_s, D_s \\ d_p, D_p \end{cases} \quad (4)$$

W celu skrócenia zapisu w dalszym ciągu rozważań wprowadzimy zamiast indeksów  $s$  (ciało) i  $p$  (cząstka) jeden indeks  $o$  (obiekt). Podobnie dla składowych  $x, y$  i  $z$  globalnych sił i momentów sił wprowadzimy także jeden indeks  $j$ , czyli:  $o = s, p; j = x, y, z$ .

Wówczas wymiary poszczególnych sił lokalnych lub globalnych można wyrazić w postaci następujących zależności wymiarowych:

– Lokalne siły ciężkości

$$[F_g] = \begin{cases} [F_{gf}] = [g]^1 [\rho_f]^1 [d_f]^3 \\ [F_{go}] = [g]^1 [\rho_o]^1 [d_o]^3 \end{cases} \quad (5)$$

– Globalne siły ciężkości

$$[F_{gz}] = \begin{cases} [F_{gfz}] = [g]^1 [\rho_f]^1 [\Omega_f] = [\rho]^1 [\rho_f]^1 [D_f]^3 \\ [F_{goz}] = [g]^1 [\rho_o]^1 [\Omega_o] = [\rho]^1 [\rho_o]^1 [D_o]^3 \end{cases} \quad (6)$$

– Lokalne siły ciśnienia

$$[F_{\Delta pf}] = [\Delta_{pf}]^1 [d_f]^2 \quad (7)$$

- Lokalne siły ciśnienia powierzchniowego

$$[\mathcal{F}_{\Delta po}] = [\Delta_{po}]^1 [d_o]^2 \quad (8)$$

- Globalne siły i momenty sił ciśnienia powierzchniowego
  - siły aerodynamiczne lub hydrodynamiczne

$$[F_{\Delta poj}] = [\Delta_{po}^* \cdot C_{oj}^*]^1 [D_o]^2 \quad (9)$$

- moment aerodynamiczny lub hydrodynamiczny

$$[M_{\Delta poj}] = [\Delta_{po}^* \cdot C_{moj}^*]^1 [D_o]^3 \quad (10)$$

gdzie:  $\Delta_{po}^*$  – charakterystyczna wielkość związana z  $\Delta_{po}$  (np. maksymalne ciśnienie dodatnie (parcie));  $C_{oj}^*$  – bezwymiarowe współczynniki sił;  $C_{moj}^*$  – bezwymiarowe współczynniki momentów sił.

- Siły lepkości lokalnej i globalnej

$$[F_{vf}] = \begin{cases} [\mu_f]^1 [V_f]^1 [d_f]^1 \\ [\mu_f]^1 [V_f]^1 [D_f]^1 \end{cases} \quad (11)$$

- Lokalne siły lepkości powierzchniowej

$$[\mathcal{F}_{vo}] = \begin{cases} [\mu_f]^1 [V_f]^1 [d_o]^1 \\ [\mu_f]^1 [V_o]^1 [d_o]^1 \end{cases} \quad (12)$$

- Lokalne siły chropowatości (szorstkości) powierzchni / tarcia powierzchniowego

$$[\mathcal{F}_{ro}] = [\mu_{ro} \cdot \Delta_{po}]^1 [d_o]^2 \quad (13)$$

- Globalne siły i momenty sił chropowatości (szorstkości) powierzchni / tarcia powierzchniowego

$$[F_{roj}] = [\mu_{ro}^* \cdot \Delta_{po}^* \cdot C_{roj}^*]^1 [D_o]^2 \quad (14)$$

$$[M_{roj}] = [\mu_{ro}^* \cdot \Delta_{po}^* \cdot C_{mroj}^*]^1 [D_o]^3 \quad (15)$$

gdzie:  $\mu_{ro}^*$  – bezwymiarowy charakterystyczny (np. średni) współczynnik szorstkości / tarcia;  $\Delta_{po}^*$  – wielkość charakterystyczna związana z  $\Delta_{po}$ ;  $C_{roj}^*$ ,  $C_{mroj}^*$  – bezwymiarowe współczynniki szorstkości / tarcia sił i momentów sił.

- Lokalne siły sprężyste / elastyczne
  - w płynie

$$[F_{Kf}] = [K_f]^1 [d_f]^2 \quad (16)$$

– w ciele stałym

$$[F_{Es}] = [E_s]^1 [d_s]^2; \quad [F_{Gs}] = [G_s]^1 [d_s]^2 \quad (17)$$

– Globalna siła i moment siły sprężystej

W przypadku gdy rozpatrujemy np. drgania poprzeczno-skrętne (translacyjno-rotacyjne) ciała stałego o dwóch stopniach swobody: poprzecznym (translacyjnym)  $\zeta$  i skrętnym (rotacyjnym)  $\varepsilon$ , podpartego sprężystości, zanurzonego w strumieniu płynu, zamiast wielkości  $E_s$  i  $G_s$  można przyjąć również następujące wielkości charakteryzujące globalną sprężystą siłę i globalny sprężysty moment ciała stałego: 1. Współczynniki sztywności poprzecznej  $k_z$  i skrętnej  $k_\varepsilon$ ; 2. Częstotliwości drgań własnych poprzecznych  $f_z$  i skrętnych  $f_\varepsilon$ . Wówczas będzie:

– dla globalnej siły poprzecznej sprężystej

$$[F_{kz}] = [k_z]^1 [D_s]^1; \quad [F_{fz}] = \begin{cases} [f_z]^2 [\rho_s] [D_s]^4 \\ [f_z]^2 [\rho_s] [\Omega_s] [D_s] \end{cases} \quad (18)$$

– dla globalnego momentu skręcającego sprężystego

$$[M_{k\varepsilon}] = [k_\varepsilon]^1; \quad [M_{f\varepsilon}] = \begin{cases} [f_\varepsilon]^2 [\rho_s] [D_s]^4 \\ [f_\varepsilon]^2 [\rho_s] [\Omega_s] [D_s] \end{cases} \quad (19)$$

– Sprężysty moment zginający i sprężysty moment skręcający przekroju poprzecznego belki

Gdyby zaś rozpatrywać drgania poprzeczno-skrętne belki, dla której właściwości sprężyste giętno-skrętne są scharakteryzowane przez sztywność giętną  $EJ$  i sztywność skrętną  $GJ_t$ , gdzie:  $J$ ,  $J_t$  – momenty bezwładności przekroju poprzecznego belki przy zginaniu i skręcaniu, wówczas otrzymamy:

$$[M_{EJ}] = [E][J][D_s]^{-2}; \quad [M_{GJ_t}] = [G][J_t][D_s]^{-2} \quad (20)$$

– Siły bezwładności lokalnej i globalnej

– w płynie

$$[F_{if}] = \begin{cases} ([\rho_f]^1 [V_f]^2 [d_f]^2 \\ ([\rho_f]^1 [V_f]^2 [D_f]^2 \end{cases} \quad (21)$$

– w ciele stałym lub cząstce

$$[F_{io}] = \begin{cases} ([\rho_o]^1 [V_o]^2 [d_o]^2 \\ ([\rho_o]^1 [V_o]^2 [D_o]^2 \end{cases} \quad (22)$$

– pochodzące od tzw. masy związanej płynu poruszającej się wspólnie (współdrążącej) z ciałem stałym lub cząstką

Gdy ciało stałe (lub cząstka) zanurzone w płynie doznaje przyspieszenia – np. w ruchu drgającym – część masy płynu związanej z ciałem stałym wykonuje ruchy zbliżone do ruchów ciała stałego. Ta dodatkowa masa płynu związana z ciałem stałym nazywa się masą

związaną (ang. *added mass lub virtual mass lub hydrodynamic mass*). Powstają wtedy dodatkowe siły bezwładności płynu  $F_{if_o}$  – zwane siłami masowymi związanymi – oddziaływujące na ciało stałe. Wówczas będzie:

$$[F_{if_o}] = \begin{cases} [\rho_f]^1 [V_o] [d_o]^2 \\ [\rho_f]^1 [V_o] [D_o]^2 \end{cases} \quad (23)$$

- Globalne bezwładnościowe siły i momenty sił drgającego ciała stałego i związane masy otaczającego płynu

Gdyby znowu jak poprzednio wziąć pod uwagę drgania translacyjno-rotacyjne ciała stałego o dwóch stopniach swobody: translacyjnym  $\zeta$  i rotacyjnym  $\varepsilon$ , zanurzonego w płynie, wówczas zamiast wielkości  $\rho_s$  i  $\rho_f$  można by przyjąć również następujące wielkości charakteryzujące siły bezwładności translacyjnej i momenty bezwładności rotacyjnej oraz siłę i moment bezwładności pochodzące od masy związanej:

- siła bezwładności poprzecznej (translacyjnej) ciała  $F_{isz}$

$$[F_{isz}] = \begin{cases} [m]^1 [V_s]^2 [D_s]^{-1} \\ [\rho_s]^1 [\Omega_s]^1 [V_s]^2 [D_s]^{-1} \end{cases} \quad (24)$$

- moment bezwładności obrotowej (rotacyjnej) ciała  $M_{is\varepsilon}$

$$[M_{is\varepsilon}] = \begin{cases} [J]^1 [V_s]^2 [D_s]^{-2} \\ [\rho_s]^1 [\Omega_s]^1 [V_s]^2 \end{cases} \quad (25)$$

- siła masy związanej wynikająca z ruchu translacyjnego ciała  $F_{ifsz}$

$$[F_{ifsz}] = \begin{cases} [m_f]^1 [V_s]^2 [D_s]^{-1} \\ [\rho_f]^1 [\Omega_s]^1 [V_s]^2 [D_s]^{-1} \end{cases} \quad (26)$$

- moment siły masy związanej wynikający z ruchu rotacyjnego ciała  $M_{ifse}$

$$[M_{ifse}] = \begin{cases} [J_f]^1 [V_s]^2 [D_s]^{-2} \\ [\rho_f]^1 [\Omega_s]^1 [V_s]^2 \end{cases} \quad (27)$$

- wynikowa siła bezwładności działająca na ciało  $F_{iz\Sigma} = F_{isz} + F_{ifsz}$

$$[F_{iz\Sigma}] = [\rho_s + \rho_f]^1 [\Omega_s]^1 [V_s]^2 [D_s]^{-1} \quad (28)$$

- wynikowy moment siły bezwładności działający na ciało  $M_{i\varepsilon\Sigma} = M_{is\varepsilon} + M_{ifse}$

$$[M_{i\varepsilon\Sigma}] = [\rho_s + \rho_f]^1 [\Omega_s]^1 [V_s]^2 \quad (29)$$

W powyższych zależnościach przyjęto następujące dodatkowe oznaczenia:  $m$  – masa ciała;  $J$  – moment bezwładności obrotowej ciała;  $m_f$  – masa związana płynu;  $J_f$  – moment bezwładności obrotowej masy związanej płynu;  $\Omega_s$  – objętość ciała.

- Lokalna siła napięcia powierzchniowego

$$[F_{tf}] = [\sigma_{tf}][d_f] \quad (30)$$

- Lokalna siła tłumienia

$$F_{ds}] = [\mu_s]^1[V_s]^1[d_s]^2 \quad (31)$$

- Globalna siła i moment siły tłumienia

Rozpatrzmy znowu – podobnie jak wyżej – drgania translacyjno-rotacyjne ciała stałego zanurzonego w płynie. Zakładając dalej, że siła i moment siły tłumienia drgań opisane są modelami liniowymi typu wiskotycznego (tj. proporcjonalnymi odpowiednio do prędkości drgań translacyjnych  $\dot{z}$  i rotacyjnych  $\dot{\varepsilon}$ ), można wprowadzić następujące współczynniki tłumienia drgań translacyjnych  $\mu_{sz}$  i rotacyjnych  $\mu_{s\varepsilon}$ :  $\mu_{szs}$ ,  $\mu_{szf}$  – współczynniki siły tłumienia translacyjnego pochodzące odpowiednio od ciała i płynu (tzw. siły tłumienia hydrodynamicznego lub aerodynamicznego);  $\mu_{ses}$ ,  $\mu_{sef}$  – podobnie jak wyżej tylko w odniesieniu do momentu siły tłumienia rotacyjnego;  $\mu_{sz\Sigma} = \mu_{szs} + \mu_{szf}$  – wynikowy współczynnik tłumienia translacyjnego;  $\mu_{s\varepsilon\Sigma} = \mu_{ses} + \mu_{sef}$  – wynikowy współczynnik tłumienia rotacyjnego. Wówczas będzie:

- dla globalnej siły tłumiącej drgania translacyjne

$$[F_{dz\Sigma}] = [(\mu_{szs} + \mu_{szf})]^1[V_s]^1 \quad (32)$$

- dla globalnego momentu siły tłumiącej drgania rotacyjne

$$[M_{d\varepsilon\Sigma}] = [(\mu_{ses} + \mu_{sef})]^1[V_s][D]^{-1} \quad (33)$$

- Globalne siły wyporu dla ciała i cząstki

$$[F_b] = [\rho_f]^1[g]^1[D_o]^3 \quad (34)$$

- Globalna siła oporu falowego dla ciała stałego

$$[F_w] = [A_w]^1[\lambda_w]^{-1}[\rho_f]^1[V_w]^2[D_s]^2 \quad (35)$$

- Globalne siły unoszenia lub opadania ciała stałego lub cząstek materialnych zanurzonych w płynie

$$[F_{gb}] = \begin{cases} [(\rho_s - \rho_f)]^1[g]^1[D_o]^3 \\ [(\rho_s - \rho_f)]^1[V_t]^2[D_o]^2 \end{cases} \quad (36)$$



### 3. Wybrane przypadki szczególne stosunków sił i stosunków momentów sił jako liczby podobieństwa

#### 3.1. Stosunek globalnej siły bezwładności do globalnej siły lepkości dla przepływów i opływów płynów – liczba Reynoldsa $Re$

W zastosowaniach praktycznych przepływów i opływów płynów wokół ciał stałych w obszarze przestrzennym o wymiarze charakterystycznym  $D_f$ , występuje kilka takich sytuacji kiedy globalne siły bezwładności i lepkości są najważniejsze. Wówczas pola prędkości i ciśnienia w tym obszarze są wprost zależne od stosunku globalnej siły bezwładności do globalnej siły lepkości.

Rozważmy kilka przykładów takich przypadków. Gdy płyn przepływa przez całkowicie wypełniony przewód, siły ciężkości nie zmieniają formy przepływu. Zjawiska kapilarne są wtedy także praktycznie nieistotne. Wtedy najważniejszymi są siły bezwładności i tarcia w płynie spowodowane lepkością. Podobna sytuacja ma miejsce, gdy samolot porusza się w powietrzu z prędkością taką, że ściśliwość powietrza jest mało istotna. Także w przypadku okrętu podwodnego odpowiednio głęboko zanurzonego w morzu tak, że nie wytwarza on fal na powierzchni morza, jedynymi istotnymi siłami są siły tarcia i bezwładności.

Rozważając stosunek sił bezwładności i lepkości otrzymamy parametr bezwymiarowy zwany liczbą Reynoldsa  $Re$ , na cześć Osborne Reynoldsa, który przedstawił to w publikacji jego pracy eksperymentalnej w 1882 r.

Tę samą liczbę kryterialną otrzymał Lord Rayleigh 10 lat później, który rozwinął teorię podobieństwa dynamicznego. Stosunek tych dwóch sił daje:

$$F_{vf}^{if} = \frac{F_{if}}{F_{vf}} \triangleq Re = \frac{\rho_f V_f^2 D_f^2}{\mu_f V_f D_f} = \frac{\rho_f V_f D_f}{\mu_f} = \frac{V_f D_f}{\nu_f} \quad (37)$$

gdzie:  $\nu_f = \mu_f / \rho_f$  – lepkość kinematyczna płynu;  $\triangleq$  – znak, który oznacza że odpowiednie zależności są sobie równe lub równoważne w odniesieniu do wymiarów.

W każdym konsyistentnym układzie jednostek miar,  $Re$  jest liczbą bezwymiarową. Wymiar liniowy  $D_f$  może być dowolną długością związaną z formą przepływu. I tak np. dla rury całkowicie wypełnionej płynem, może to być np. jej średnica lub promień, co wpływa na odpowiednią zmianę wartości liczby  $Re$ .

Jeżeli dwa układy, w rozważanym przypadku prototyp i jego model (np. dwa przewody rurowe o różnych średnicach), mają być równoważne dynamicznie, gdy najważniejszymi siłami są siły bezwładności i siły tarcia wiskotycznego, muszą one obydwie mieć takie same wartości liczby  $Re$ . Gdy w obu przypadkach będzie to ten sam płyn, z warunku tego wynika, że należy zrealizować dużą prędkość przepływu płynu w modelu o małych wymiarach liniowych. Istnieje także możliwość porównania przepływów dwóch płynów o różnych lepkościach pod warunkiem, że  $D_f$  i  $V_f$  są dobrane w taki sposób aby dawać te same wartości liczby  $Re$ .

Ponieważ ciśnienia powierzchniowe działające na ciało zanurzone w płynie zależą od liczby  $Re$ , stąd też wynikające z nich aerodynamiczne lub hydrodynamiczne siły i momenty sił są także zależne od  $Re$ .

W przypadku opływów płynów wokół ciał stałych o wymiarze charakterystycznym  $D_s$ , zwykle przyjmuje się, że:  $D_f = D_s = D$ .

Gdy liczby Reynoldsa dla modelu i jego prototypu są takie same, wówczas otrzymuje się następujące wyrażenia dla skal: prędkości  $k_V$ , czasu  $k_t$ , przyspieszenia  $k_a$ , siły  $k_F$  i ciśnienia  $k_p$ :

$$Re = \frac{D_M V_M}{\nu_M} = \frac{D_P V_P}{\nu_P} \quad (38)$$

$$k_V = \frac{V_P}{V_M} = \frac{D_M V_P}{D_P V_M} = \frac{k_V}{k_D} \quad (39)$$

$$k_t = \frac{k_D}{k_V} = \frac{k_D^2}{k_V} \quad (40)$$

$$k_a = \frac{k_V}{k_t} = \frac{k_V}{k_D^3} \quad (41)$$

$$k_F = k_\rho k_V^2 k_D^2 = k_\rho k_V^2 \quad (42)$$

$$k_p = k_F k_D^{-2} = k_\rho k_V^2 k_D^{-2} \quad (43)$$

**Przykład 1 ilustrujący rozważane zagadnienie** (por. [3])

Ciało sztywne osiowosymetryczne o długości  $D_P = 3,0$  m ma być holowane z prędkością  $V_P = 4$  m · s<sup>-1</sup> głęboko pod powierzchnią wody o temperaturze 15°C. W celu określenia siły potrzebnej do holowania ciała wykonano jego model o długości  $D_M = 0,6$  m i przetestowano go w tunelu aerodynamicznym przy prędkości powietrza 20 m/s i temperaturze 15°C. W tych warunkach lepkość dynamiczna wody jest 62,5 razy większa od lepkości powietrza. Na podstawie badań w tunelu aerodynamicznym wyznaczono siłę oporu aerodynamicznego równą 100 N.

W analizowanym przypadku właściwym kryterium podobieństwa jest kryterium Reynoldsa. Model został wykonany w skali:  $k_D = 3,0/0,6 = 5$ . Także skale prędkości i lepkości dynamicznej są zdeterminowane:  $k_V = 4/20 = 0,2$ ;  $k_\mu = 62,5$ . Ponieważ ze związku  $\nu = \mu/\rho$  wynika  $k_\nu = k_\mu/k_\rho$ , więc warunek  $Re_P = Re_M$  może być spełniony przez stosowny dobór skali gęstości  $k_\rho = \frac{\rho_P}{\rho_M}$ . Na tę wielkość można wpływać przez dobór ciśnienia powietrza w badaniach modelowych. Wyłania się więc konieczność stosowania tunelu ciśnieniowego. Obliczmy najpierw wymagane ciśnienie powietrza w tunelu.

Z równości liczb Reynoldsa wynika następująca zależność dla skal odpowiednich wielkości:

$$\frac{k_\rho k_V k_D}{k_\mu} = 1 \rightarrow k_\rho = \frac{k_\mu}{k_V k_D} = \frac{62,5}{0,2 \cdot 5} = 62,5$$

Ponieważ gęstość wody wynosi:  $\rho_P = 1000$  kg/m<sup>3</sup>, więc żądana gęstość powietrza wynosi:

$$\rho_M = \frac{\rho_P}{k_\rho} = \frac{1000}{62,5} = 16$$
 kg · m<sup>-3</sup>

Powietrze o temperaturze 15°C ma taką gęstość przy ciśnieniu 1,2 MPa. Model należy zatem przetestować w tunelu aerodynamicznym ciśnieniowym przy takim właśnie ciśnieniu.

Dla obliczenia skali sił wykorzystujemy wzór (42):

$$k_F = k_\rho k_V^2 k_D^2 = 62,5 \cdot 0,2^2 \cdot 5^2 = 62,5$$

Ostatecznie holowanie obiektu pod wodą wymaga siły:

$$F_p = k_F F_M = 62,5 \cdot 100 = 6250 \text{ N} = 6,25 \text{ kN}$$

### 3.2. Stosunek globalnej siły bezwładności do globalnej siły ciężkości – liczba Froude'a $Fr$

Typowym zjawiskiem związanym z działaniem grawitacji jest tworzenie się fal na swobodnej powierzchni cieczy. Są one źródłem oporu falowego, jaki napotyka każde ciało ślizgające się po tej powierzchni lub płynące przy częściowym zanurzeniu w cieczy. Oczywiście w jednym i drugim przypadku pewien udział w oporze całkowitym ma również opór lepki.

Rozważając same tylko globalne siły bezwładności i ciężkości, ich stosunek nazywany jest liczbą Froude'a, na cześć Williama Froude'a, który wykonał doświadczenia z płaskimi płytami holowanymi na wodzie w celu oszacowania oporów statków spowodowanych działaniem fal powierzchniowych. Stosunek globalnych sił bezwładności do ciężkości wynosi:

$$F_{gf}^{if} = \frac{F_{if}}{F_{gf}} \triangleq Fr = \frac{\rho_f V_{rel}^2 D_f^2}{g \rho_f D_f^3} = \frac{V_{rel}^2}{g D_f}, \quad V_{rel} = \begin{cases} V_s \\ V_t \\ V_s - V_t \end{cases} \quad (44)$$

W tym przypadku jako wymiar charakterystyczny  $D_f$  jest przyjmowana głębokość zbiornika  $D_d$  albo wymiar ciała  $D_s$ .

Częściej w zastosowaniach, jako liczbę Froude'a definiuje się pierwiastek z wyrażenia (44), gdyż wówczas  $V_{rel}$  występuje w pierwszej potęgze, podobnie jak w liczbie  $Re$ . Wtedy liczbę  $Fr$  określa zależność:

$$Fr = \frac{V_{rel}}{\sqrt{g D_f}} \quad (45)$$

Siły ciężkości i bezwładności dominują zwykle w następujących zagadnieniach [2]: działanie fal wodnych generowanych przez statek; przepływ wody w kanałach otwartych; działanie strumienia wody na słup podporowy mostu; przepływ wody nad przelewem spływowym; wypływ strumienia płynu z kryzy itp.

Z porównania zależności (37) i (44) wynika, że obydwie te kryteria podobieństwa nie mogą być spełnione jednocześnie, gdy płyn ma tę samą lepkość, ponieważ kryterium Reynoldsa implikuje zmianę prędkości odwrotnie proporcjonalnie do  $D_f$ , podczas gdy z kryterium Froude'a wynika zmiana prędkości zgodnie z  $\sqrt{D_f}$ . W tym sensie kryteria Reynoldsa i Froude'a należy uznać za wzajemnie sprzeczne. Jeżeli tarcie i grawitacja są brane pod uwagę, powinno się zdecydować, który z tych czynników jest ważniejszy albo bardziej użyteczny. W przypadku np. statku [2], holowanie modelu w wodzie daje sumaryczny jego opór, z którego należy wydzielić empirycznie wyznaczony opór tarcia, aby określić opór falowy, który może się okazać mniejszy niż opór tarcia. Ale dla tej samej liczby Froude'a opór falowy statku w pełnej skali może być wyznaczony na podstawie wyników badań modelowych. Wtedy dodaje się do oporu falowego obliczony opór tarcia, aby otrzymać opór sumaryczny statku w skali naturalnej.

W sytuacji oporu projektowanego statku można też postąpić następująco [3]: określić się na podstawie badań modelowych wykonanych przy prędkości odpowiedniej  $V_{Fr}$  wynikającej z kryterium Froude'a, a następnie poprawkę na wpływ lepkości szacuje się przez ekstrapolację wyników uzyskanych na kilku modelach wykonanych w różnej skali.

Przy przenoszeniu na obiekt wyników pomiarów uzyskanych na modelu z zachowaniem równości (45), korzystamy ze wzorów na skale:

– prędkości

$$k_V = \frac{V_P}{V_M} = \frac{\sqrt{g_P D_P}}{\sqrt{g_M D_M}} = \sqrt{\frac{D_P}{D_M}} = \sqrt{k_D} \quad (46)$$

– czasu (np. okresu fali)

$$k_t = k_D k_V^{-1} = \sqrt{k_D} \quad (47)$$

– sił

$$k_F = k_\rho k_V^2 k_D^2 = k_\rho k_D^3 \quad (48)$$

W zagadnieniach przepływu wody w kanałach otwartych [2] tarcie płynu jest czynnikiem istotnym, podobnie jak grawitacja i bezwładność, więc widocznie występują tu podobne trudności. Jednakże dla przepływów cieczy w kanałach otwartych występuje zwykle w pełni rozwinięta turbulencja tak, że straty tarcia hydraulicznego są praktycznie proporcjonalne do  $V_f^2$ , jak to będzie pokazane dalej, a więc tarcie płynu w kanałach otwartych jest z rzadkimi wyjątkami niezależne od liczby Reynoldsa i w konsekwencji jest funkcją tylko samej liczby Froude'a.

Jedynym sposobem równoczesnego spełnienia kryteriów Reynoldsa i Froude'a dla modelu i jego prototypu jest użycie płynów o różnych lepkościach w tych dwóch przypadkach. Czasami można to zrealizować, lecz często jest to albo niepraktyczne lub niemożliwe.

Gdy obliczamy liczbę  $Fr$ , długość  $D$  powinna być wymiarem liniowym, który jest istotny w formie przepływu. Na przykład dla statku jest to zwykle długość tzw. linii wodnej, natomiast dla kanałów otwartych przyjmuje się zwykle głębokość przepływu.

**Przykład 2 ilustrujący rozważane zagadnienie** (por. [2]).

Model łódki wykonany w skali 1:50 ma opór falowy 0,02 N przy prędkości łódki 1,0 m/s. Należy wyznaczyć odpowiedni opór falowy prototypu, moc silnika wymaganą dla prototypu i prędkość prototypu łódki w tym teście.

Siły ciężkości i bezwładności tu dominują, zatem należy skorzystać z kryterium Froude'a:

$$Fr_P = Fr_M \rightarrow \left( \frac{V}{\sqrt{gD}} \right)_P = \left( \frac{V}{\sqrt{gD}} \right)_M \rightarrow \frac{V_P^2}{D_P} = \frac{V_M^2}{D_M}$$

Zatem:

$$\frac{V_P^2}{V_M^2} = k_V^2 = \frac{D_P}{D_M} = k_D = 50$$

Ponieważ:

$$k_F = k_\rho k_V^2 k_D^2 = k_D^3$$

stąd:

$$F_P = k_D^3 F_M = 50^3 \cdot 0,02 = 2500\text{N} = 2,5\text{kN}$$

$$V_P = \sqrt{k_D} \cdot V_M = \sqrt{50} \cdot 1 = 7,1\text{m/s}$$

$$P_P = F_P \cdot V_P = 2,5 \cdot 7,1 = 17,75\text{kNm/s} = 17,75\text{kW}$$

### 3.3. Stosunek globalnej siły oporu falowego dla pływającego ciała (np. statku) do globalnej siły bezwładności płynu

Rozpatrzmy zagadnienie oporu falowego ciała pływającego po powierzchni pofalowanego płynu, pozostającego poza tym w bezruchu. Niech ciało o wymiarze charakterystycznym  $D_s$  porusza się z prędkością  $V_s$ , zaś fala powierzchniowa biegnąca w stronę ciała pływającego ma parametry:  $V_w$  – prędkość fali;  $A_w$  – amplituda fali;  $\lambda_w$  – długość fali.

Zdefiniujemy liczbę podobieństwa wynikającą w tym przypadku ze stosunku globalnej siły oporu falowego do globalnej siły bezwładności płynu:

$$F_{if}^w = \frac{F_w}{F_{if}} \triangleq \Pi_{if}^w = \frac{A_w \lambda_w^{-1} \rho_f V_w^2 D_s^2}{\rho_f V_s^2 D_s^2} = \frac{A_w}{\lambda_w} \cdot \left(\frac{V_w}{V_s}\right)^2 \quad (49)$$

Z powyższej relacji widać, że liczbami kryterialnymi są w tym przypadku liczby:  $A_w/\lambda_w$  i  $V_w/V_s$ .

### 3.4. Stosunek lokalnych sił ciśnienia powierzchniowego ciała / cząstki do lokalnych sił bezwładności płynu – liczba Eulera, współczynnik ciśnienia $C_p$

Bezwymiarowa wielkość odniesiona do stosunku lokalnych sił ciśnienia powierzchniowego do lokalnych sił bezwładności jest znana jako liczba Eulera  $Eu$ . Można ją wyrazić na kilka sposobów; jedną z form jest:

$$F_{if}^{\Delta p_o} = \frac{F_{\Delta p_o}}{F_{if}} \triangleq Eu = \frac{\Delta p_o d^2}{\rho_f V_f^2 d^2} = \frac{\Delta p_o}{\rho_f V_f^2} \quad (50)$$

gdzie:  $d = d_f = d_s = d_p$ .

W aerodynamice i hydrodynamice różnych obiektów inżynierskich częściej zamiast liczby  $Eu$  używa się tzw. współczynnika ciśnienia  $C_p$ , który jest także bezwymiarowy, zdefiniowanego następująco:

$$C_p = \frac{\Delta p_o}{\frac{1}{2} \rho_f V_f^2} = \frac{\Delta p_o}{q_f} \quad (51)$$

gdzie:  $q_f = \frac{1}{2} \rho_f V_f^2$  – tak zwane ciśnienie prędkości strumienia / wiatru lub ciśnienie dynamiczne przepływu.

Zarówno liczby  $Eu$  oraz  $C_p$  są ważnymi kryteriami podobieństwa dynamicznego ale głównie w przepływie nieściśliwym, bowiem ciśnienie i gęstość traktuje się tu jako parametry niezależne. Obydwie te liczby zależą przede wszystkim od liczby  $Re$ .

W dynamice gazów – gdy przepływowi gazu towarzyszą małe zmiany ciśnienia – używa się współczynnika ciśnienia  $C_p$  zdefiniowanego następująco:

$$C_p = \frac{\Delta p_f}{\frac{1}{2}\bar{\rho}V_f^2} \quad (52)$$

gdzie  $\bar{\rho}$  oznacza gęstość średnią w przedziale ciśnień ( $p_f - \Delta p_f; p_f + \Delta p_f$ ).

Jeśli tylko ciśnienie i bezwładność mają wpływ na przepływ, liczba Eulera dla dowolnej formy brzegu będzie pozostawać stałą. Jeśli natomiast inne parametry (lepkość, ściślność, grawitacja itp.) powodują, że forma przepływu ulega zmianie, liczba  $Eu$  także będzie się zmieniać.

### 3.5. Stosunek lokalnych sił ciśnienia powierzchniowego do lokalnych sił lepkości powierzchniowej

W tym przypadku liczba podobieństwa przybiera postać:

$$F_{vo}^{\Delta p_o} = \frac{F_{\Delta p_o}}{F_{v_o}} \triangleq \frac{\Delta p_o d_o^2}{\mu_f V_f d_o} = \frac{\Delta p_o d_o}{\mu_f V_f} = \frac{C_p \frac{1}{2} \rho_f V_f^2 d_o}{\mu_f V_f} = \frac{1}{2} C_p \cdot Re \quad (53)$$

Ponieważ wartości współczynnika ciśnienia są liczbami rzędu 1, z zależności powyższej wynika, że dla liczb Reynoldsa większych od 10 (zdecydowana większość przypadków w aerodynamice i hydrodynamice stosowanej) lokalne siły lepkości powierzchniowej są na ogół pomijalnie małe w porównaniu z lokalnymi siłami ciśnienia powierzchniowego. Wyjątek stanowią bardzo powolne przepływy wokół ciał o małych rozmiarach (np. cząstek lub mikrocząstek materialnych).

W przypadku ruchu ciała stałego z prędkością  $V_s$  w rezerwarze nieruchomego płynu, zamiast  $V_f$  należy w powyższej zależności podstawić  $V_s$ .

### 3.6. Stosunki globalnych sił ciśnienia powierzchniowego ciała / cząstki do globalnych sił i momentów sił bezwładności płynu – współczynniki sił i momentów aerodynamicznych / hydrodynamicznych $C_{oj}$ i $C_{moj}$

– współczynniki sił i momentów aerodynamicznych / hydrodynamicznych

$$F_{if}^{\Delta p_{oj}} = \frac{F_{\Delta p_{oj}}}{F_{if}} \triangleq \frac{\Delta p_o C_{oj}^* D_o^2}{\rho_f V_f^2 D_o^2} = 2C_p^* C_{oj}^* = C_{oj}^{**} (Re, (\check{G})) \quad (54)$$

gdzie:  $(\check{G})$  – zbiór bezwymiarowych parametrów geometrycznych charakteryzujących geometrię ciała stałego / cząstki materialnej.

W zastosowaniach praktycznych powyższą zależność przepisuje się w następującej postaci:

$$F_{\Delta p_{oj}} = \frac{1}{2} \rho_f V_f^2 D_o^2 C_{oj}; \quad C_{oj} = C_{oj} (Re, (\check{G})) \quad (55)$$

gdzie:  $C_{oj}$  – współczynniki sił aerodynamicznych / hydrodynamicznych ciała / cząstki:  $C_x$  – współczynnik oporu,  $C_y$ ,  $C_z$  – współczynniki sił pionowej i bocznej.

– współczynniki momentów aerodynamicznych / hydrodynamicznych

$$M_{if}^{\Delta p_{oj}} = \frac{M_{\Delta p_{oj}}}{M_{if}} \triangleq \frac{\Delta p_o C_{moj}^* D_o^3}{\rho_f V_f^2 D_o^3} = 2C_p^* C_{moj}^* = C_{moj}^{**} (Re, (\check{G})) \quad (56)$$



$$M_{\Delta p_{oj}} = \frac{1}{2} \rho_f V_f^2 D_o^3 C_{m_{oj}}; \quad C_{m_{oj}} = C_{m_{oj}}(Re, (\check{G})) \quad (57)$$

gdzie:  $C_{m_{oj}}$  – współczynniki momentów aerodynamicznych / hydrodynamicznych ciała / cząstki;  $C_{m_x}$  – współczynnik momentu obracającego;  $C_{m_y}$  – współczynnik momentu pochylającego;  $C_{m_z}$  – współczynnik momentu odchyłającego.

### 3.7. Stosunki globalnych sił i momentów sił szorstkości / tarcia powierzchniowego ciała / cząstki do globalnych sił i momentów sił bezwładności płynu – współczynniki sił i momentów aerodynamicznych / hydrodynamicznych szorstkości / tarcia powierzchniowego $C_{roj}$ i $C_{mroj}$

Szorstkość powierzchni brzegowej ciała stałego może mieć istotny wpływ na wartości sił i momentów aerodynamicznych / hydrodynamicznych wywieranych przez płyn na ciało stałe. Wówczas obok liczby Reynoldsa należy uwzględnić jeszcze inne liczby kryterialne związane z szorstkością powierzchni ciała, zdefiniowane np. jako:

– współczynniki sił szorstkości / tarcia powierzchniowego

$$F_{if}^{roj} = \frac{F_{roj}}{F_{if}} \triangleq \frac{\mu_{ro}^* \Delta p_o C_{roj} D_o^2}{\rho_f V_f^2 D_o^2} = 2C_p \mu_{ro}^* C_{roj}^* = C_{roj}^{**}(Re, (\check{G})) \quad (58)$$

$$F_{roj} = \frac{1}{2} \rho V_f^2 D_o^2 C_{roj}; \quad C_{roj} = C_{roj}(Re, (\check{G})) \quad (59)$$

gdzie:  $C_{roj}$  – współczynniki sił szorstkości / tarcia powierzchniowego ciała / cząstki

– współczynniki momentów sił szorstkości / tarcia powierzchniowego

$$M_{if}^{roj} = \frac{M_{roj}}{M_{if}} \triangleq \frac{\mu_{ro}^* \Delta p_o C_{mroj} D_o^3}{\rho_f V_f^2 D_o^3} = 2C_p \mu_{ro}^* C_{mroj}^* = C_{mroj}^{**}(Re, (\check{G})) \quad (60)$$

$$M_{roj} = \frac{1}{2} \rho V_f^2 D_o^3 C_{mroj}; \quad C_{mroj} = C_{mroj}(Re, (\check{G})) \quad (61)$$

gdzie:  $C_{mroj}$  – współczynniki momentów sił szorstkości / tarcia powierzchniowego ciała / cząstki.

W przypadku, gdy ciało stałe porusza się w rezerwuarze płynu, który poza obszarem oddziaływania ciała jest nieruchomy, prędkość płynu  $V_f$  należy zastąpić prędkością ciała / cząstki  $V_o$ .

Szorstkość / chropowatość modelu powinna być wyskalowana w takim samym stosunku jak inne wymiary liniowe, co oznacza że mały model powinien mieć powierzchnie znacznie gładziej niż powierzchnia prototypu. Wymaganie to nakłada jednak pewne granice na skalę modelowania geometrycznego, która może być użyta jeśli rzeczywiste podobieństwo geometryczne ma być spełnione. Jednakże w przypadku modelu rzeki wykonanego w skali pionowej większej niż skala horyzontalna, może okazać się koniecznością uczynienie odpowiednio szorstkiej powierzchni modelu w celu symulowania warunków przepływu jak w strumieniu rzeczywistym [2]. Nie ma prostych reguł w sytuacjach, gdy w modelu nie zapewnia się właściwych warunków podobieństwa geometrycznego chropowatości powierzchni; zastępcza,

efektywna szorstkość powinna być wyznaczona na podstawie kilku prób, aż warunki przepływu okażą się typowe dla tych w prototypie.

### 3.8. Stosunek lokalnych sił bezwładności do lokalnych sił sprężystych płynu – liczba Cauchy’ego $Ca$ , liczba Macha $Ma$

Gdy ściśliwość płynu jest istotna, konieczne należy rozważyć stosunek lokalnych sił bezwładności płynu do lokalnych sił sprężystych płynu, zwany liczbą Cauchy’ego  $Ca$ .

Zatem:

$$F_{ef}^{if} = \frac{F_{if}}{F_{ef}} \triangleq Ca = \frac{\rho_f V_f^2 a_f^2}{K_f d_f^2} = \frac{\rho_f V_f^2}{K_f} \quad (62)$$

Biorąc pod uwagę, że prędkość fali akustycznej (lub dźwięku)  $c_f$  w rozważanym ośrodku materialnym określa wzór:

$$c_f = \sqrt{\frac{K_f}{\rho_f}} \quad (63)$$

Liczbę Cauchy’ego można wyrazić także jako:

$$Ca = \frac{v_f^2}{c_f^2} = \left(\frac{v_f}{c_f}\right)^2 = Ma^2 \quad (64)$$

gdzie:  $Ma$  – tak zwana liczba Macha, na cześć uczonego Austriaka Macha.

Między liczbami  $Re$  i  $Ma$  również istnieje pewien związek, istotny przy modelowaniu przepływu gazów rozrzedzonych [3]. Z kinetycznej teorii gazów wiadomo, że lepkość kinematyczna jest proporcjonalna do średniej długości  $\Lambda$  drogi swobodnej cząstek oraz do prędkości dźwięku:  $v \sim c_f \Lambda$ . Stosunek:

$$\frac{Ma}{Re} \sim \frac{\Lambda}{l} = Kn \quad (65)$$

zwany jest liczbą Knudsen, gdzie  $l$  jest charakterystyczną długością odniesienia. Rozrzedzony gaz może być dopóty traktowany jako ośrodek ciągły, dopóki droga swobodnego przebiegu cząstek jest bardzo mała wobec  $l$ , czyli dla  $Ma \ll Re$ ; z reguły przyjmuje się  $Ma < 10^{-3} Re$ .

Z tego punktu widzenia w warstwie przyściennej (o grubości  $\delta$ ) rozróżnia się cztery rodzaje przepływów gazu:

1.  $\Lambda/\delta < 0,01$  – gaz może być traktowany jako ośrodek ciągły.
2.  $0,01 < \Lambda/\delta < 0,1$  – droga swobodna cząstek jest już porównywalna z grubością warstwy i występują nieciągłości profilu prędkości oraz temperatury; stąd nazwa – przepływ poślizgowy. Chcąc analizować te nieciągłości, trzeba uwzględnić cząsteczkową budowę gazu, czyli stosować kinetyczną teorię gazów.
3.  $\Lambda/\delta > 0,1$  i  $\Lambda/l < 10$  – przepływ też ma charakter poślizgowy, przy czym droga swobodnego przebiegu cząstek może być tego samego rzędu co charakterystyczna długość odniesienia.
4.  $\Lambda/l > 10$  – odległości między cząstkami są tak duże, iż można pomijać ich wzajemne zderzenia; stąd nazwa – przepływ swobodnomolekularny. O jego charakterze decydują jedynie zderzenia cząstek z powierzchnią ciała „opływającego”.

Jeżeli liczba  $Ma$  jest mniejsza niż 1, przepływ nazywa się poddźwiękowy; jeśli jest równa 1, przepływ jest dźwiękowy (krytyczny z tzw. falą uderzeniową); gdy  $Ma > 1$  przepływ nazywa się naddźwiękowy; przy ekstremalnie dużych wartościach liczby  $Ma$  przepływy nazywane są hiperdźwiękowe.

Możliwe jest równoczesne spełnienie kryteriów Macha i Reynoldsa w dwóch przepływach powietrza o jednakowej temperaturze  $T$  [3]. Oznacza to możliwość spełnienia dwóch równości:

$$\frac{k_V}{k_c} = 1, \quad \frac{k_D k_V}{k_\nu} = 1 \quad \text{dla} \quad k_T = 1 \quad (66)$$

Dowód tego stwierdzenia przedstawia się następująco. Korzystając z tego, że skala lepkości kinematycznej  $k_V = k_\mu/k_\rho$ , po eliminacji  $k_V$  otrzymujemy z wzorów (66):

$$\frac{k_\rho k_D k_c}{k_\mu} = 1 \quad (67)$$

Lepkość dynamiczna płynów jest silnie zależna od temperatury, przy czym dla powietrza zachodzi proporcjonalność  $\mu \sim T$ , więc  $k_\mu = k_T$ . Odpowiednia zależność dla prędkości dźwięku ma postać  $c \sim \sqrt{T}$ , więc  $k_c = \sqrt{k_T}$ . Podstawienie tych związków w (66) daje  $k_\rho k_D / \sqrt{k_T} = 1$  lub dla  $k_T = 1$ :

$$k_\rho k_D = 1 \quad (68)$$

Tym samym została wykazana niesprzeczność kryteriów Macha i Reynoldsa dla dwóch przepływów powietrza o jednakowej temperaturze. W praktyce laboratoryjnej gęstość powietrza w przepływie modelowym, a tym samym skalę gęstości  $k_\rho$ , można zmieniać w dość dużym przedziale przez zmianę ciśnienia  $p$ . Dlatego badania aerodynamiczne wykonuje się wtedy w tunelach ciśnieniowych.

Na przykład [2], gdy przeprowadzamy badania modelowe poddźwiękowe samolotu w tunelu aerodynamicznym, zwykle konieczne należy przeprowadzać testy przy wysokim ciśnieniu aby spełnić kryterium Reynoldsa bez wprowadzania efektów ściśliwości. Załóżmy np., że  $k_D = D_P/D_M = 20$ . Jeśli lepkość  $\nu$  i gęstość  $\rho$  powietrza będą takie same w modelu i prototypie, wówczas by spełnić kryterium Reynoldsa:  $V_M = 20 \times V_P$ . Dla samolotu poruszającego się z normalną prędkością uczyniłoby to liczbę Macha dla modelu znacznie większą od 1, a wówczas efekty ściśliwości powietrza zniekształciłyby znacznie wyniki pomiarów. Jeśli natomiast przeprowadzimy testy pod ciśnieniem 2 MPa (tj. około 20-razy większym od ciśnienia atmosferycznego) i przy takich samych temperaturach modelu i prototypu – wówczas będzie:  $\rho_M = 20 \times \rho_P$  i  $\mu_M \approx \mu_P$ , ponieważ lepkość powietrza zmienia się bardzo mało ze zmianami ciśnienia (lub gęstości). Wtedy model powinien być testowany przy prędkości równej prędkości prototypu, aby liczby  $Re$  dla modelu i prototypu były podobne.

Natomiast przy małych prędkościach przepływu gazu (orientacyjnie dla  $Ma < 0,3$ ) podobieństwo pól ciśnień osiąga się przy spełnieniu kryterium Eulera.

### 3.9. Stosunek lokalnych sił bezwładności do lokalnych sił napięcia powierzchniowego płynu – liczba Webera

W pewnych przypadkach przepływu, napięcie powierzchniowe może mieć znaczący wpływ, ale normalnie jest pomijalne. Stosunek sił bezwładności do sił napięcia powierzchniowego płynu daje:

$$F_{tf}^{if} = \frac{F_{if}}{F_{tf}} \triangleq \Pi_{tf}^{if} = \frac{\rho_f V_f^2 d_f^2}{\sigma_{tf} d_f} = \frac{\rho_f V_f^2 d_f}{\sigma_{tf}} \quad (69)$$

Pierwiastek z tej wielkości bezwymiarowej znany jest jako liczba Webera  $We$ :

$$We = \frac{V_f}{\sqrt{\frac{\sigma_{tf}}{\rho_f d_f}}} \quad (70)$$

W przypadku np. modelowania przepływu cieczy w cienkiej warstwie lub strudze po powierzchni ciała stałego, czy też ruchów kapilarnych cieczy, wymagane jest zachowanie podobieństwa pól napięcia powierzchniowego  $\sigma_{tf}$ .

Gdyby w zależności (69) zamiast siły bezwładności  $F_{if}$  przyjąć siłę ciężkości  $F_{gf}$  wówczas otrzyma się liczbę Bodego zdefiniowaną następująco:

$$F_{tf}^{gf} = \frac{F_{gf}}{F_{tf}} \triangleq \Pi_{tf}^{gf} = \frac{\rho_f g d_f^3}{\sigma_{tf} d_f} = \frac{\rho_f g d_f^2}{\sigma_{tf}} = Bo \quad (71)$$

Liczbę tę stosuje się przy modelowaniu zjawisk mechanicznych zachodzących w warunkach nieważkości lub osłabionej grawitacji ( $g < 9,81 \frac{m}{s^2}$ ).

### 3.10. Stosunki sił globalnych i wynikające z nich liczby kryterialne w przypadkach ruchów względnych typu unoszenia się lub opadania ciał stałych lub cząstek materialnych zanurzonych w płynie

**Przypadek 1: Umiarkowane lub szybkie unoszenie się lub opadanie ciał stałych lub cząstek materialnych w nieruchomym płynie**

W rozważanym przypadku decydujące są: siły ciężkości ciała / cząstek  $F_{go}$ , siły wyporu wywierane przez płyn na ciało / cząstkę  $F_{bo}$  i siły inercji płynu  $F_{if}$ . Wobec tego można wprowadzić kolejne liczby kryterialne zdefiniowane następująco:

$$F_{if}^{gb} = \frac{F_{gb}}{F_{if}} \triangleq \begin{cases} \frac{(\rho_o - \rho_f) g D_o^3}{\rho_f V_o^2 D_o^2} = \frac{\Delta \rho}{\rho_f} \cdot \frac{g D_o}{V_o^2} \\ \frac{(\rho_o - \rho_f) V_o^2 D_o^2}{\rho_f V_o^2 D_o^2} = \frac{\Delta \rho}{\rho_f} \cdot \left( \frac{V_o}{V_o} \right)^2 \end{cases} \quad (72) \quad (73)$$

W powyższych zależnościach pojawiły się trzy nowe liczby kryterialne:

– bezwymiarowy parametr masy

$$\Pi_\rho = \frac{\Delta \rho}{\rho_f} \quad (74)$$

– bezwymiarowy parametr prędkości

$$V_o^t = \frac{V_t}{V_o} \quad (75)$$

– liczba Froude'a (lub jej odwrotność) odniesiona do ciała / cząstki

$$Fr_o = \frac{V_o}{\sqrt{gD_o}} \quad (76)$$

Jeśli jako prędkość charakterystyczną  $V_o$  przyjmiemy prędkość terminalną, wówczas  $V_o^t = 1$ , oraz:

$$Fr_o = Fr_t = \frac{V_t}{\sqrt{gD_o}} \quad (77)$$

**Przypadek 2: Powolne lub bardzo powolne unoszenie się lub opadanie małych cząstek materialnych w nieruchomym płynie**

Gdy mamy do czynienia z powolnymi ruchami typu unoszenia lub opadania małych cząstek materialnych (np. pyłów, mikrocząstek ciał stałych tworzących zawiesiny, lekkich płatków śniegu, pęcherzyków powietrza itp.), decydujące o tych ruchach są: globalne siły ciężkości cząstek  $F_{gp}$ , siły wyporu wywierane przez płyn na cząstki  $F_b$  i siły lepkości płynu  $F_{vf}$ . Adekwatną w tym przypadku liczbą kryterialną byłaby np. liczba:

$$F_{vf}^{gb} = \frac{F_{gb}}{F_{vf}} \triangleq \Pi_{vf}^{gb} = \begin{cases} \frac{(\rho_p - \rho_f)gD_p^3}{\mu_f V_t D_p} = \frac{Ar}{Re_t} \\ \frac{(\rho_p - \rho_f)V_t^2 D_p^2}{\mu_f V_t D_p} = \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \cdot Re_t \end{cases} \quad (78) (79)$$

gdzie:

$$Ar = \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \cdot \frac{gD^3}{v_f^2}; \quad v_f = \frac{\mu_f}{\rho_f} \quad (80)$$

nazywa się liczbą Archimedesesa, oraz:

$$Re_t = \frac{\rho_f V_t D_p}{\mu_f} \quad (81)$$

można nazwać terminalną liczbą Reynoldsa.

**Przypadek 3: Umiarkowany lub szybki ruch płynu o prędkości poziomej  $V_f$  i umiarkowany lub szybki ruch względny opadający lub unoszący małych cząstek materialnych o prędkości terminalnej  $V_t$**

Przypadek taki dotyczyć może np. opadu śniegu przy wietrze, opadu deszczu przy wietrze, ruchu pęcherzyków powietrza w poruszającym się poziomo płynie itp.

Adekwatnymi w tym przypadku mogą być np. następujące liczby kryterialne:

$$F_{if}^{gbs} = \frac{F_{gbs}}{F_{if}} \triangleq \Pi_{if}^{gb} = \begin{cases} \frac{\Delta\rho g D_p^3}{\rho_f V_f^2 D_p^2} = \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \cdot \frac{1}{Fr^2} \\ \frac{\Delta\rho V_t^2 D_p^2}{\rho_f V_f^2 D_p^2} = \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \cdot \left(\frac{V_t}{V_f}\right)^2 \end{cases} \quad (82)$$

$$F_{if}^{ip} = \frac{F_{ip}}{F_{if}} \triangleq \Pi_{if}^{ip} = \begin{cases} \frac{\rho_p g D_p^3}{\rho_f V_f^2 D_p^2} = \frac{\rho_p}{\rho_f} \cdot \frac{1}{Fr^2} \\ \frac{\rho_p V_t^2 D_p^2}{\rho_f V_f^2 D_p^2} = \frac{\rho_p}{\rho_f} \cdot \left(\frac{V_t}{V_f}\right)^2 \end{cases} \quad (83)$$

Jak widać, tak w jednej jak i drugiej liczbie kryterialnej pojawiają się bezwymiarowe wielkości związane z masą  $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_f}$  lub  $\frac{\rho_p}{\rho_f}\right)$  – które można nazwać liczbami podobieństwa masy – oraz liczba Froude’a  $Fr$  lub bezwymiarowa wielkość związana z prędkością  $V_t/V_f$ . Tę ostatnią liczbę podobieństwa:

$$V_f^t = \frac{V_t}{V_f} \quad (84)$$

lub jej odwrotność, można nazwać liczbą podobieństwa kinematycznego.

## Literatura

- [1] Flaga A. *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*. Arkady, Warszawa 2008.
- [2] Daugherty R.L., Franzini J.B. *Fluid Mechanics with engineering applications*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1977.
- [3] Gryboś R. *Podstawy mechaniki płynów. Część I i II*. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1998.

# Ratios of forces and forces moments as dynamic similarity criteria of various phenomena occurring in wind engineering, snow engineering and fluid dynamics

## Part I – Fundamentals and steady problems

Andrzej Flaga

*Faculty of Civil Engineering, Institute of Structural Mechanics, Cracow University of Technology  
e-mail: liwpk@windlab.pl*

**Abstract:** The work concerns dynamic similarity criteria of various phenomena occurring in wind engineering, snow engineering and fluid dynamics derived from ratios of forces and forces moments affecting these phenomena. Derived and analyzed in part I dynamic similarity criteria, mainly concern the following steady problems: 1. Fluid flows and flows past objects ; 2. Fluid-solid contact problems; 3. Problems of a solid floating on a fluid with and without of the surface waves.

**Keywords:** dynamic similarity criteria, wind engineering, snow engineering, fluid dynamics, steady problems.



# Stosunki sił i momentów sił jako kryteria podobieństwa dynamicznego różnych zjawisk występujących w inżynierii wiatrowej, inżynierii śniegowej i dynamice płynów

## Część II – Zagadnienia nieustalone o charakterze okresowym, quasi-okresowym lub turbulentnym

Andrzej Flaga

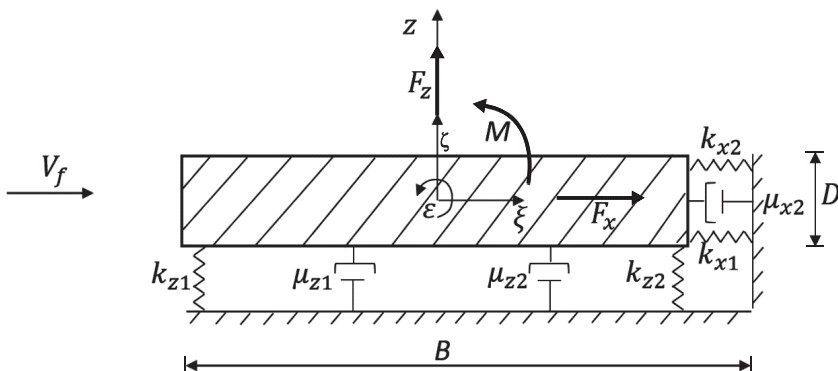
Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Mechaniki Budowli, Politechnika Krakowska  
e-mail: liwpk@windlab.pl

**Streszczenie:** Praca dotyczy kryteriów podobieństwa dynamicznego różnych zjawisk występujących w inżynierii wiatrowej, inżynierii śniegowej i dynamice płynów wyprowadzonych ze stosunków sił i momentów sił wpływających na te zjawiska. Wyprowadzone i analizowane w części II kryteria podobieństwa dynamicznego dotyczą głównie następujących zagadnień nieustalonych o charakterze okresowym, quasi-okresowym i turbulentnym: 1. Drgań ciała stałego w nieruchomym lub ruchomym płynie; 2. Odrywania się cząstek/płatek/klastrów śniegowych z wierzchniej warstwy złoża śniegu; 3. Wirujących turbin, śmigieł lub śrub okrętowych.

**Słowa kluczowe:** kryteria podobieństwa dynamicznego, inżynieria wiatrowa, inżynieria śniegowa, dynamika płynów, zagadnienia ustalone.

### 1. Stosunki sił i wynikające z nich liczby kryterialne w przypadkach drgań ciał stałych w płynach

Rozpatrzmy to zagadnienie na przykładzie drgań translacyjno – rotacyjnych ciała stałego o trzech stopniach swobody: translacyjnych  $\xi$ ,  $\zeta$  i rotacyjnym  $\epsilon$ , zanurzonego najpierw w nieruchomym a później ruchomym płynie. Model ciała drgającego przyjęto jak na Rys. 1. Jest to ciało stałe sztywne podparte elastyczno – wiskotycznie.



Rys. 1. Układ ideowy z masą, sprężynami i tłumikami wiskotycznymi w przepływającym płynie

Zakładamy, że wymuszenie układu ma składowe statyczne (średnie) – np. wynikające z grawitacji – i dynamiczne (fluktuacyjne). Zajmować się będziemy tylko składowymi dynamicznymi wymuszenia, generującymi drgania układu wokół jego położenia równowagi statycznej.

### 1.1. Przypadek drgań wymuszonych ciała w płynie nieruchomym (poza obszarem kontaktowym płynu z ciałem stałym) – $V_f = 0$

W rozważanym przypadku należy uwzględnić następujące zbiory składowych globalnych sił i momentów sił:

– związane z właściwościami sprężystymi podpór ciała

$$(F_{eS}) = (F_{kx}, F_{kz}, M_{k\epsilon}) \quad (1)$$

– związane z właściwościami tłumiącymi (wiskotycznymi) podpór ciała

$$(F_{dS}) = (F_{\mu x}, F_{\mu z}, M_{\mu\epsilon}) \quad (2)$$

– związane z właściwościami tłumiącymi (wiskotycznymi) płynu otaczającego ciało przy ich ruchu względnym

$$(F_{dsf}) = (F_{\mu xf}, F_{\mu zf}, M_{\mu\epsilon f}) \quad (3)$$

Zakłada się, że wypadkowe siły i moment siły tłumienia wiskotycznego drgań wynoszą:

$$(F_{d\Sigma}) = (F_{\mu x} + F_{\mu xf}; F_{\mu z} + F_{\mu zf}; M_{\mu\epsilon} + M_{\mu\epsilon f}) \quad (4)$$

– związane z bezwładnością ciała

$$(F_{iS}) = (F_{ix}, F_{iz}, M_{i\epsilon}) \quad (5)$$

– związane z masą związaną płynu

$$(F_{if}) = (F_{ixf}, F_{izf}, M_{i\epsilon f}) \quad (6)$$

Zakłada się, że wypadkowe siły i moment sił bezwładności ciała wynoszą:

$$(F_{i\Sigma}) = (F_{ix} + F_{ixf}; F_{iz} + F_{izf}; M_{i\epsilon} + M_{i\epsilon f}) \quad (7)$$

– związane z wymuszeniem drgań układu

$$(F_a) = (F_x, F_z, M) \quad (8)$$

przy czym:

$$F_x = F_x(t) = F_{ox} \check{F}_x(t; (G_x)) = F_{ox} \check{F}_x^*(\check{t}; (\check{G}_x)) \quad (9)$$

$$F_z = F_z(t) = F_{oz}\check{F}_z(t; (G_z)) = F_{oz}\check{F}_z^*(\check{t}; (\check{G}_z)) \quad (10)$$

$$M = M(t) = M_o\check{M}(t; (G_\varepsilon)) = M_o\check{M}^*(\check{t}; (\check{G}_\varepsilon)) \quad (11)$$

gdzie:  $F_{ox}$ ,  $F_{oz}$ ,  $M_o$  – amplitudy wymuszenia (lub inne charakterystyczne wielkości wymiarowe wymuszenia);  $t$  – czas;  $\check{t} = \frac{V_z t}{B}$  – czas bezwymiarowy;  $(G_x)$ ,  $(G_z)$ ,  $(G_\varepsilon)$ ;  $(\check{G}_x)$ ,  $(\check{G}_z)$ ,  $(\check{G}_\varepsilon)$  – wymiarowe i bezwymiarowe zbiory parametrów wymuszenia;  $\check{F}_x^*(...)$ ,  $\check{F}_z^*(...)$ ,  $\check{M}^*(...)$  – bezwymiarowe funkcje czasu bezwymiarowego i bezwymiarowych parametrów wymuszenia, które stanowią określone funkcyjne kryteria podobieństwa dla wymuszenia.

Parametry charakteryzujące właściwości mechaniczne rozpatrywanego zagadnienia można pogrupować następująco:

- właściwości sprężyste: sztywności podpór sprężystych

$$(k_s) = (k_x, k_z, k_\varepsilon) \quad (12)$$

- właściwości tłumiące: współczynniki tłumienia wiskotycznego ciała i płynu

$$(\mu_s) = (\mu_x, \mu_z, \mu_\varepsilon); (\mu_f) = (\mu_{xf}, \mu_{zf}, \mu_{\varepsilon f}) \quad (13)$$

- właściwości bezwładnościowe: masy i momenty bezwładności mas ciała i płynu

$$(m_s) = (m, m, J); (m_f) = (m_{xf}, m_{zf}, J_f) \quad (14)$$

- charakterystyki wymuszenia: amplitudy wymuszenia

$$(F_{os}) = (F_{ox}, F_{oz}, M_o) \quad (15)$$

- wymiary charakterystyczne ciała

$$(D_s) = (D, B, L); \Omega_s \quad (16)$$

gdzie:  $D$ ,  $B$  – wymiary poprzeczne ciała;  $L$  – długość ciała;  $\Omega_s$  – objętość ciała,

- gęstości masy ciała i płynu

$$(\rho) = (\rho_s, \rho_f) \quad (17)$$

przy czym:

$$\rho_s \Omega_s = m \quad (18)$$

- charakterystyczna prędkość ciała

$$V_s = V_z \quad (19)$$

W dalszym ciągu rozważań wyznaczmy stosunki składowych odpowiednich sił i momentów sił w odniesieniu do jednej ze składowych sił tak, aby tworzyły one wielkości bezwymiarowe. Powiązane z nimi liczby bezwymiarowe będą odpowiednimi liczbami podobieństwa dynamicznego analizowanego zagadnienia. Jako siłę odniesienia przyjmiemy składową pionową siłę bezwładności ciała i masy związanej płynu, tj.:

$$F_{iz\Sigma} = F_{iz} + F_{izf} \quad (20)$$

Natomiast jako bazę wymiarową przyjmiemy trójelementowy zbiór:  $(m_\Sigma, V_z, B)$ , gdzie:

$$m_\Sigma = m + m_{zf} \quad (21)$$

otrzymamy wtedy następujące zależności:

– liczby kryterialne związane z bezwładnością ciała i płynu

$$F_{iz\Sigma}^{ix\Sigma} = \frac{F_{ix\Sigma}}{F_{iz\Sigma}} \triangleq \pi_{iz\Sigma}^{ix\Sigma} = \frac{(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}}{(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} = \frac{1+\frac{m_{zf}}{m}}{1+\frac{m_{zf}}{m}} \quad (22)$$

$$F_{iz\Sigma}^{i\varepsilon\Sigma} = \frac{F_{i\varepsilon\Sigma}}{F_{iz\Sigma}} = \frac{M_{i\varepsilon}}{BF_{iz\Sigma}} \triangleq \pi_{iz\Sigma}^{i\varepsilon\Sigma} = \frac{(J+J_f)V_z^2 B^{-2}}{(m+m_{zf})V_z^2} = \frac{J_\Sigma}{m_{z\Sigma}B^2} \quad (23)$$

Wprowadźmy następujące dodatkowe oznaczenia i zależności:

$$m_{xf} = \rho_f \Omega_s \mathcal{K}_x = m_f \mathcal{K}_x \quad (24)$$

$$m_{zf} = \rho_f \Omega_s \mathcal{K}_z = m_f \mathcal{K}_z \quad (25)$$

$$J = mB^2 \mathcal{K} = \rho_s \Omega_s B^2 \mathcal{K} \quad (26)$$

$$J_f = \rho_f \Omega_s B^2 \mathcal{K}_\varepsilon \quad (27)$$

Wówczas liczby kryterialne  $\pi_{iz\Sigma}^{ix\Sigma}$  i  $\pi_{iz\Sigma}^{i\varepsilon\Sigma}$  można także wyrazić jako:

$$\Pi_{iz\Sigma}^{ix\Sigma} = \frac{1+\frac{\rho_f}{\rho_s}\mathcal{K}_x}{1+\frac{\rho_f}{\rho_s}\mathcal{K}_z} \quad (28)$$

$$\Pi_{iz\Sigma}^{i\varepsilon\Sigma} = \frac{\left(\mathcal{K}+\frac{\rho_f}{\rho_s}\mathcal{K}_\varepsilon\right)}{\left(1+\frac{\rho_f}{\rho_s}\mathcal{K}_z\right)} \quad (29)$$

Jeśli uznać, że wielkość bezwymiarową  $\mathcal{K}$  można obliczyć dla danej geometrii ciała, natomiast wielkości bezwymiarowe:  $\mathcal{K}_x$ ,  $\mathcal{K}_z$ ,  $\mathcal{K}_\varepsilon$  można oszacować teoretycznie lub wyznaczyć doświadczalnie dla wybranych geometrii ciał, to jedyną liczbą kryterialną pozostaje tu liczba:

$$\Pi_{\rho fs} = \frac{\rho_f}{\rho_s} \quad (30)$$

– liczby kryterialne związane ze sprężystością podpór ciała stałego

$$F_{iz\Sigma}^{kx} = \frac{F_{kx}}{F_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{kx} = \frac{k_x B}{(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} \quad (31)$$

$$F_{iz\Sigma}^{kz} = \frac{F_{kz}}{F_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{kz} = \frac{k_z B}{(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} \quad (32)$$

$$F_{iz\Sigma}^{k\varepsilon} = \frac{F_{k\varepsilon}}{F_{iz\Sigma}} = \frac{M_{k\varepsilon}}{BF_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{k\varepsilon} = \frac{k_\varepsilon}{(m+m_{zf})V_z^2} \quad (33)$$

Wprowadźmy następujące dodatkowe oznaczenia i zależności:

$$\frac{k_x}{m+m_{xf}} = \omega_x^2 \quad (34)$$

$$\frac{k_z}{m+m_{zf}} = \omega_z^2 \quad (35)$$

$$\frac{k_\varepsilon}{J+J_f} = \omega_\varepsilon^2 \quad (36)$$

gdzie:  $\omega_x$ ,  $\omega_z$ ,  $\omega_\varepsilon$  – tzw. częstości kołowe drgań własnych translacyjnych i rotacyjnych analizowanego układu.

Ponadto wyrażmy prędkość charakterystyczną ciała stałego  $V_z$  jako:

$$V_z = \omega_z B \quad (37)$$

Wówczas ostatnie trzy liczby kryterialne można wyrazić jako:

$$\pi_{iz\Sigma}^{kx} = \left(\frac{\omega_x}{\omega_z}\right)^2 \frac{1 + \frac{\rho_f}{\rho_s} \kappa_x}{1 + \frac{\rho_f}{\rho_s} \kappa_z} \quad (38)$$

$$\pi_{iz\Sigma}^{kz} = 1 \quad (39)$$

$$\pi_{iz\Sigma}^{k\varepsilon} = \left(\frac{\omega_\varepsilon}{\omega_z}\right)^2 \frac{\left(\kappa + \frac{\rho_f}{\rho_s} \kappa_\varepsilon\right)}{\left(1 + \frac{\rho_f}{\rho_s} \kappa_z\right)} \quad (40)$$

Jak widać, nowymi liczbami kryterialnymi są tu liczby:

$$\Pi_{\omega xz} = \frac{\omega_x}{\omega_z}, \quad \Pi_{\omega \varepsilon z} = \frac{\omega_\varepsilon}{\omega_z} \quad (41)$$

– liczby kryterialne związane z tłumieniem wiskotycznym ciała i płynu

$$F_{iz\Sigma}^{\mu x \Sigma} = \frac{F_{\mu x \Sigma}}{F_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{\mu x \Sigma} = \frac{(\mu_x + \mu_{xf})V_z}{(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} = \frac{\mu_{x\Sigma}}{m_z \Sigma \omega_z} = \frac{\mu_{x\Sigma}}{m_{x\Sigma}} \cdot \frac{m_{x\Sigma}}{m_z \Sigma} \cdot \frac{1}{\omega_z} \quad (42)$$

$$F_{iz\Sigma}^{\mu z \Sigma} = \frac{F_{\mu z \Sigma}}{F_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{\mu z \Sigma} = \frac{(\mu_z + \mu_{zf})V_z}{(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} = \frac{\mu_{z\Sigma}}{m_z \Sigma} \cdot \frac{1}{\omega_z} \quad (43)$$

$$F_{iz\Sigma}^{\mu\varepsilon\Sigma} = \frac{F_{\mu\varepsilon\Sigma}}{F_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{\mu\varepsilon\Sigma} = \frac{(\mu_\varepsilon + \mu_{\varepsilon f})V_z B^{-1}}{B(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} = \frac{\mu_{\varepsilon\Sigma}}{m_{z\Sigma}} \cdot \frac{1}{B^2 \omega_z} = \frac{\mu_{\varepsilon\Sigma}}{J_\Sigma} \cdot \frac{J_\Sigma}{m_{z\Sigma}} \cdot \frac{1}{B^2 \omega_z} \quad (44)$$

Wprowadźmy kolejne oznaczenia i zależności:

$$\frac{\mu_{x\Sigma}}{m_{x\Sigma}} = 2\gamma_x \omega_x \quad (45)$$

$$\frac{\mu_{z\Sigma}}{m_{z\Sigma}} = 2\gamma_z \omega_z \quad (46)$$

$$\frac{\mu_{\varepsilon\Sigma}}{J_\Sigma} = 2\gamma_\varepsilon \omega_\varepsilon \quad (47)$$

Liczby kryterialne (42), (43) i (44) przyjmą wtedy postać:

$$\Pi_{iz\Sigma}^{\mu x\Sigma} = 2\gamma_x \left( \frac{\omega_x}{\omega_z} \right) \frac{\left( 1 + \frac{\rho_f}{\rho_s} \kappa_x \right)}{\left( 1 + \frac{\rho_f}{\rho_s} \kappa_z \right)} \quad (48)$$

$$\Pi_{iz\Sigma}^{\mu z\Sigma} = 2\gamma_z \quad (49)$$

$$\Pi_{iz\Sigma}^{\mu \varepsilon\Sigma} = 2\gamma_\varepsilon \left( \frac{\omega_\varepsilon}{\omega_z} \right) \frac{\left( \kappa + \frac{\rho_f}{\rho_s} \kappa_\varepsilon \right)}{\left( 1 + \frac{\rho_f}{\rho_s} \kappa_z \right)} \quad (50)$$

Bezwymiarowe współczynniki tłumienia:  $\gamma_x$ ,  $\gamma_z$ ,  $\gamma_\varepsilon$  nazywają się ułamkami tłumienia krytycznego i charakteryzują one stopień tłumienia (zmniejszania się amplitudy) drgań własnych tłumionych translacyjnych i rotacyjnych rozważanego układu.

– liczby kryterialne związane z amplitudami wymuszenia

$$F_{iz\Sigma}^{ox} = \frac{F_{ox}}{F_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{ox} = \frac{F_{ox}}{(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} = \frac{F_{ox}}{k_z B} = \frac{F_{ox}}{k_x B} \cdot \frac{k_x}{k_z} = \frac{\xi_{st}}{B} \cdot \frac{k_x}{k_z} \quad (51)$$

$$F_{iz\Sigma}^{oz} = \frac{F_{oz}}{F_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{oz} = \frac{F_{oz}}{(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} = \frac{F_{oz}}{k_z B} = \frac{\zeta_{st}}{B} \quad (52)$$

$$F_{iz\Sigma}^{o\varepsilon} = \frac{M_o}{BF_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{o\varepsilon} = \frac{M_o}{B(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} = \frac{M_o}{k_z B^2} = \frac{M_o}{k_\varepsilon} \cdot \frac{k_\varepsilon}{k_z B^2} = \varepsilon_{st} \cdot \frac{k_\varepsilon}{k_z B^2} \quad (53)$$

gdzie:  $\xi_{st}$ ,  $\zeta_{st}$ ,  $\varepsilon_{st}$  – statyczne przemieszczenia translacyjne i kąt obrotu od amplitud odpowiednich wymuszeń.

## 1.2. Przypadek drgań wymuszonych ciała w płynie poruszającym się z prędkością $V_f$

Dodatkowe, odpowiednie stosunki aerodynamicznych / hydrodynamicznych sił i momentu siły do bezwładnościowych sił i momentu siły i wynikające z nich liczby podobieństwa wyniosą wtedy:

$$F_{iz\Sigma}^{\Delta psx} = \frac{F_{\Delta psx}}{F_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{\Delta psx} = \frac{\rho_f V_f^2 B^2 C_x}{(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} = \frac{\rho_f V_f^2 B}{k_z} \cdot C_x \quad (54)$$



$$F_{iz\Sigma}^{\Delta psz} = \frac{F_{\Delta psz}}{F_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{\Delta psz} = \frac{\rho_f V_f^2 B^2 C_y}{(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} = \frac{\rho_f V_f^2 B}{k_z} \cdot C_y \quad (55)$$

$$F_{iz\Sigma}^{\Delta pse} = \frac{M_{\Delta pse}}{BF_{iz\Sigma}} \triangleq \Pi_{iz\Sigma}^{\Delta pse} = \frac{\rho_f V_f^2 B^3 C_m}{B(m+m_{zf})V_z^2 B^{-1}} = \frac{\rho_f V_f^2 B}{k_z} \cdot C_m \quad (56)$$

Jak widać, obok współczynników aerodynamicznych  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_m$  pojawiła się tu dodatkowa liczba kryterialna  $\rho V_f^2 B/k_z$ , którą można wyrazić także inaczej, a mianowicie:

$$\frac{\rho_f V_f^2 B}{k_z} = \frac{\rho_f V_f^2 B}{m_\Sigma f_z^2 4\pi^2} = \frac{\rho_f D^2}{\frac{m_\Sigma}{L}} \cdot \frac{B}{L} \cdot \left(\frac{V_f}{f_z D}\right)^2 \cdot \frac{1}{4\pi^2} = M_\rho \cdot \lambda_B \cdot (V_r)^2 \cdot \frac{1}{4\pi^2} \quad (57)$$

gdzie otrzymane nowe liczby kryterialne nazwano i zdefiniowano następująco:

– bezwymiarowy parametr masy

$$M_\rho = \frac{\rho_f D^2}{\frac{m_\Sigma}{L}} = \frac{\rho_f D^2}{m_\Sigma^*} \quad (58)$$

gdzie:  $m_\Sigma^* = \frac{m_\Sigma}{L}$  – gęstość masy sumarycznej na jednostkę długości ciała

– smukłość ciała

$$\lambda_B = \frac{B}{L} \quad (59)$$

– prędkość zredukowana

$$V_r = \frac{V_f}{f_z D} = \frac{1}{\frac{f_z D}{V_f}} = \frac{1}{St_k} \quad (60)$$

gdzie:  $St_k$  – kinematyczna liczba Strouhala.

### 1.3. Odpowiedź dynamiczna układu i związane z tym liczby kryterialne

Odpowiedź dynamiczną rozważanego układu stanowią dwa przemieszczenia translacyjne  $\xi$  i  $\zeta$  oraz kąt obrotu (skręcenia)  $\varepsilon$ . Zależą one od czasu  $t$  oraz zbioru wszystkich parametrów bezwymiarowych układu i wymuszenia, którymi mogą być np. omawiane wyżej liczby kryterialne. Oznaczając zbiory tych parametrów odpowiednio jako:  $(\check{X})$ ,  $(\check{Z})$ ,  $(\check{E})$  – relacje podobieństwa dla odpowiedzi układu przedstawiają następujące bezwymiarowe zależności funkcyjne:

$$\check{\xi} = \frac{\xi}{B} = \xi(\check{t}; (\check{X})); \quad \check{\zeta} = \frac{\zeta}{B} = \zeta(\check{t}; (\check{Z})); \quad \varepsilon = \check{\varepsilon} = \check{\varepsilon}(\check{t}; (\check{E})) \quad (61)$$

Relacje te pozwolą przenieść wyniki badań odpowiedzi modelu rozważanego układu i wymuszenia, gdy spełnione będą przynajmniej najważniejsze liczby kryterialne omówione wyżej.

## 2. Zjawisko odrywania się cząstek / płatków / klastrów śniegowych z wierzchniej warstwy złoza śniegu

Zjawisko to jest bardzo złożone i może ono dotyczyć wierzchniej warstwy pokrywy śnieżnej na gruncie, na dachach budynków itp. Od niego zależy dalszy transport (redystrybucja) pokrywy śnieżnej, tworzenie się zasp lub tzw. worków śnieżnych.

Oprócz geometrii wierzchniej warstwy pokrywy śnieżnej, rodzaju i struktury złoża śniegu (złoża uwarstwione o różnych gęstościach poszczególnych warstw: śnieg zbity, mokry, zlodowaciały, puszysty itp), na zjawisko odrywania się cząstek śniegowych z wierzchniej warstwy pokrywy śnieżnej niezbyt zbitego śniegu, mają wpływ głównie następujące siły: siły wynikające z ciśnienia wiatru na powierzchni górnej wierzchniej warstwy; siły ciężkości cząstek w tej warstwie oraz siły spójności poszczególnych cząstek w warstwie górnej podlegającej zjawisku redystrybucji pokrywy śnieżnej przy wiejącym wietrze.

Przyjmujemy, że wielkościami charakterystycznymi dla zjawiska odrywania się cząstek śniegowych są następujące wielkości wymiarowe w warstwie powierzchniowej pokrywy śnieżnej; ciśnienie szczytowe wiatru na górnej powierzchni warstwy  $\rho_p$ ; średnia gęstość śniegu  $\rho_s$ ; średni wymiar cząstek śniegowych (lub grubość warstwy przypowierzchniowej podlegającej redystrybucji)  $d_{ps}$ ; przyspieszenie ziemskie  $g$ ; średni współczynnik sił spójności cząstek śniegowych  $\mu_{ps}$ , który można interpretować jako graniczną wartość naprężenia rozciągającego – wynikającego ze spójności cząstek śniegowych – po przekroczeniu której ma miejsce utrata spójności cząstek śniegowych.

Poszczególne siły mające wpływ na zjawisko oderwania się cząstek śniegowych można wówczas wyrazić następującymi zależnościami sformułowanymi lokalnie na powierzchni zewnętrznej opływającego obiektu:

– siły wynikające z ciśnienia wiatru, normalne do powierzchni górnej pokrywy śnieżnej

$$F_{pp} = p_p d_{ps}^2 = \frac{1}{2} \rho_a V_{ap}^2 C_{pp} d_{ps}^2 \quad (62)$$

gdzie:  $\rho_a$  – gęstość masy powietrza atmosferycznego;  $V_{ap}$  – prędkość szczytowa wiatru w punkcie referencyjnym przed obiektem, przy czym:

$$V_{ap} = \bar{V}_a + g_v \sigma_{va} = \bar{V}_a \left( 1 + g_v \frac{\sigma_{va}}{\bar{V}_a} \right) = \bar{V}_a (1 + g_v I_{va}) \quad (63)$$

gdzie:  $g_v$  – współczynnik wartości szczytowej prędkości wiatru (zwykle  $\rho_v \in (3; 4)$ , średnio  $g_v \cong 3,5$ );  $I_{va}$  – intensywność fluktuacji (turbulencji) napływającego strumienia powietrza (wiatru);  $C_{pp}$  – współczynnik ciśnienia szczytowego wiatru określony wzorem:

$$C_{pp} = \frac{\bar{p} + g_p \sigma_p}{\frac{1}{2} \rho_a \bar{V}_a^2} = C_p + g_p \sigma_{Cp} \quad (64)$$

gdzie:  $\bar{p}$  – średnie ciśnienie wiatru;  $g_p$  – współczynnik wartości szczytowej ciśnienia wiatru (liczba rzędu 4 lub więcej);  $\sigma_p$  – odchylenie standardowe ciśnienia wiatru;  $\frac{1}{2} \rho_a \bar{V}_a^2 = q_a$  – ciśnienie prędkości wiatru w punkcie referencyjnym przed obiektem; współczynnik  $C_{pp}$  zależy głównie od geometrii obiektu, położenia punktu na powierzchni zewnętrznej obiektu i parametrów napływającego strumienia powietrza (ciśnienia prędkości, profilu wiatru określonego np. wykładnikiem prawa potęgowego, intensywności turbulencji  $I_{va}$ , zakresu liczby Reynoldsa  $Re$  przy obiektach opływowych bez ostrych krawędzi);

– składowa normalna siły ciężkości

$$F_{gs}^\alpha = \rho_s g d_{ps}^3 \cos \alpha \quad (65)$$

gdzie:  $\alpha$  – kąt pochylenia połaci dachowej (ogólniej – powierzchni górnej wierzchniej warstwy);

– siły spójności w kierunku normalnym do powierzchni górnej wierzchniej warstwy

$$F_{cs} = \mu_{cs} d_{ps}^2 \quad (66)$$

Aby wystąpiło zjawisko oderwania cząstek śniegu, przy przyjętym modelu tego zjawiska, powinna być spełniona nierówność:

$$\begin{aligned} \frac{F_{pp} - F_{gs}^a}{F_{cs}} &= \frac{\frac{1}{2} \rho_a \bar{V}_a^2 (1 + \rho_v I_{va})^2 C_{pp} d_{ps}^2 - \rho_s g d_{ps}^3 \cos \alpha}{\mu_{cs} d_{ps}^2} \\ &= \left[ \frac{1}{2} (1 + g_v I_{va})^2 C_{pp} - \frac{\rho_s}{\rho_a} \cdot \frac{g d_{ps}}{\bar{V}_a^2} \cdot \cos \alpha \right] \cdot \frac{\rho_a \bar{V}_a^2}{\mu_{cs}} = \Pi_{\mu_{cs}} > 1 \end{aligned} \quad (67)$$

Liczba kryterialna  $\Pi_{\mu_{cs}}$ , właściwa dla analizowanego zjawiska, zawiera w sobie następujące szczegółowe liczby kryterialne:  $I_{va} = \sigma_{va} / \bar{V}_a$ ;  $C_{pp}$ ;  $\rho_s / \rho_a$ ;  $\frac{g d_{ps}}{\bar{V}_a^2} = \frac{1}{(Fr_{ps})^2}$ ;  $\alpha$ ;  $\rho_a \bar{V}_a^2 / \mu_{cs}$ .

Zwykle spełnienie kryterium  $(\Pi_{\mu_{cs}})_M = (\Pi_{\mu_{cs}})_P$  może stanowić dość duży problem badawczy. Jednak spełnienie warunku:  $(\Pi_{\mu_{cs}})_M > 1$ , gdy  $(\Pi_{\mu_{cs}})_P > 1$ , już takim problemem nie musi być i zależy od rodzaju materiału sypkiego symulującego cząstki śniegu w badaniach modelowych redystrybucji pokrywy śnieżnej.

### 3. Kryteria podobieństwa zjawisk okresowych – Liczba Strouhala $St$ (jednoczesności)

#### 3.1. Odrywanie się wirów i wzbudzenie wirowe

Zjawisko odrywania się wirów i związane z nim wzbudzenie wirowe smukłych elementów konstrukcyjnych lub konstrukcji o osi podłużnej usytuowanej normalnie do przepływu, są zjawiskami okresowymi lub quasi-okresowymi. Rozważmy stosunek dwóch globalnych sił przypadających na jednostkę długości konstrukcji smukłej, a mianowicie: globalnej amplitudy siły wzbudzenia wirowego  $F_{os}^v$  i globalnej siły bezwładności napływającego płynu  $F_{if}$ . Niech parametrem amplitudy siły poprzecznej wzbudzenia wirowego będzie częstotliwość odrywania się wirów  $f^v$ . Przyjmując pozostałe parametry jak poprzednio, otrzymamy:

$$F_{if}^{vos} = \frac{F_{os}^v}{F_{if}} \triangleq \Pi_{if}^{vos} = \frac{f^v \rho_f V_f D_s^2}{\rho_f V_f^2 D_s} = \frac{f^v D_s}{V_f} = St_v \quad (68)$$

Ponieważ częstotliwość odrywania się wirów i ich konfiguracja za ciałem (tzw. ścieżka wirowa) zależą od śladu aerodynamicznego / hydrodynamicznego za ciałem – a ten z kolei zależy od liczby  $Re$  – stąd też w ogólności należy przyjąć, że:

$$St_v = St_v(Re; (\check{G})) \quad (69)$$

Gdy zjawisko odrywania się wirów ma charakter rezonansowy (tj.  $f^v = f_y$  gdzie  $f_y$  jest częstotliwością drgań własnych poprzecznych ciała), wówczas można napisać:

$$V_c^v = \frac{f_y D_s}{St_v} \quad (70)$$

### 3.2. Wirujące turbiny, śmigła, śruby okrętowe itp.

Rozpatrzmy stosunek dwóch globalnych sił bezwładności płynu na jednostkę długości wirującej łopaty wirnika / śmigła / śruby, a mianowicie: siły obwodowej  $F_{if\theta}$  leżącej w płaszczyźnie wirnika, normalnej do łopaty; siły osiowej  $F_{ifx}$  równoległej do prędkości napływającego strumienia płynu  $V_f$  (lub prędkości osiowej względnej strumienia płynu i poruszającego się wirnika). Niech parametrem siły bezwładności  $F_{if\theta}$  będzie prędkość obwodowa łopaty  $V_\theta$ , przy czym:

$$V_\theta = \omega R = 2\pi nR \quad (71)$$

gdzie:  $\omega$  – prędkość kątowa wirowania;  $R$  – promień wirnika,  $n$  – częstość wirowania (tj. liczba obrotów w jednostce czasu). Pozostałe parametry przyjmijmy jak poprzednio: Wówczas będzie:

$$F_{ifx}^{if\theta} = \frac{F_{if\theta}}{F_{ifx}} \triangleq \Pi_{ifx}^{if\theta} = \frac{V_\theta \rho_f V_f D_s}{\rho_f V_f^2 D_s} = \frac{V_\theta}{V_f} = \frac{\omega R}{V_f} = 2\pi \frac{nR}{V_f} \quad (72)$$

Otrzymane tu liczby kryterialne noszą nazwy:

– wyróżnik szybkobieżności

$$Z = \frac{\omega R}{V_f} \quad (73)$$

- liczba Strouhala lub jednoczesności

$$St_n = \frac{nR}{V_f} \quad (74)$$

W badaniach modelowych śmigła lub śruby okrętowej za wymiar charakterystyczny przyjmuje się średnicę koła opisanego  $D$ . W takim razie  $St_n = \frac{nD}{V_f}$ , lecz częściej stosuje się odwrotność tej liczby  $\frac{1}{St_n} = \lambda$ , zwaną posuwem śmigła lub śruby. Dla śrub okrętowych  $\lambda = 0,03 \div 3$ , a dla śmigieł  $\lambda = 0,1 \div 2$ .

### 4. Zagadnienia wentylacji naturalnej, swobodnej konwekcji ciepła i dyfuzji

Zdefiniowane dotąd liczby kryterialne są najbardziej istotne w dynamice płynów i ciał stałych lub cząstek materialnych. Stanowią one drobną część wszystkich liczb kryterialnych, jakimi posługuje się teoria podobieństwa i modelowania dynamicznych zjawisk fizycznych, w tym dynamiki płynów. W zasadzie każde równanie, opisujące jakiś proces fizyczny, dostarcza co najmniej jednej liczby kryterialnej. W zależności od natury zagadnienia, niektóre z nich są wzajemnie zależne. Rozpatrzmy wybrane przykłady w zakresie dynamiki płynów [3].

Modelowanie zjawisk dynamicznych zachodzących w płynach niejednorodnych, o zmiennej gęstości wymaga stosowania liczby Archimedesusa:

$$Ar = \frac{\Delta \rho_f g d^3}{\rho_f \nu^2} \quad (75)$$

gdzie:  $\Delta \rho_f$  – zmiana gęstości płynu;  $d$  – charakterystyczny wymiar liniowy (np. wysokość mierzona od pewnego poziomu),  $\nu$  – lepkość kinematyczna płynu.

Jeżeli różnica gęstości  $\Delta\rho_f$  spowodowana jest różnicą temperatur  $\Delta T$  płynu, to czynnik  $\Delta\rho_f/\rho_f$  trzeba zastąpić czynnikiem  $\beta\Delta T$ , gdzie  $\beta$  jest współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Odpowiednią liczbą kryterialną jest w tym przypadku liczba Grashofa  $Gr$  zdefiniowana jako:

$$Gr = \beta\Delta T_f \frac{gd^3}{\nu^2} \quad (76)$$

zwana też cieplną liczbą Archimedesesa. Odgrywa ona pewną rolę w zagadnieniach wentylacji naturalnej i swobodnej konwekcji ciepła.

Wypór może wystąpić też w związku z różnicą stężenia  $\Delta c$  domieszki zawartej w ośrodku płynnym. W tym przypadku stosuje się dyfuzyjną liczbę Archimedesesa lub Grashofa:

$$Ar_d = \xi\Delta c \frac{gd^3}{\nu} \quad (77)$$

gdzie  $\xi = \frac{1}{\rho_f} \frac{\Delta\rho_f}{\Delta c}$  to współczynnik proporcjonalności.

Proces wymiany masy w postaci dyfuzji, może polegać na ruchach molekularnych lub na przepływie wewnętrznym, jako ruchu pewnej masy płynu względem pozostałej. Kryterium podobieństwa dyfuzji molekularnej można wyprowadzić z równania Ficka (jednowymiarowego):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (78)$$

gdzie  $D^*$  to współczynnik dyfuzji molekularnej.

Przyjmując jako wielkości odniesienia charakterystyczny wymiar liniowy  $d^*$  i charakterystyczny czas (okres czasu)  $t^*$ , i doprowadzając to równanie do postaci bezwymiarowej, otrzymamy adekwatną w tym przypadku liczbę podobieństwa  $Fo_d$ , zwaną dyfuzyjną liczbą Fouriera:

$$Fo_d = \frac{D^*t^*}{d^*} \quad (79)$$

W zagadnieniu konwekcyjnej wymiany masy jednowymiarowe równanie tego procesu ma postać:

$$V \frac{\partial c}{\partial x} = D^{**} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (80)$$

gdzie:  $D^{**}$  – współczynnik dyfuzji konwekcyjnej.

Kolejna liczba podobieństwa, związana z tym równaniem, nazywa się dyfuzyjną liczbą Pecleta  $Pe_d$  i jest zdefiniowana następująco:

$$Pe_d = \frac{vd^*}{D^{**}} \quad (81)$$

Porównując ze sobą dwie ostatnie liczby można w konkretnym przypadku wnioskować o intensywności obu procesów dyfuzji: molekularnej i konwekcyjnej.

Podzielimy liczbę  $Pe_d$  przez  $Re$ . W wyniku otrzymamy po prostu stosunek lepkości kinematycznej  $\nu$  do współczynnika dyfuzji konwekcyjnej  $D^{**}$ :

$$\frac{Pe_d}{Re} = \frac{\nu}{D^{**}} = Sc \quad (82)$$

zwany liczbą Schmidta lub dyfuzyjną liczbą Prandtla. Dla gazów  $Sc \sim 1$ . Natomiast lepkość kinematyczna  $\nu$  cieczy, w szczególności wody w normalnych warunkach, jest rzędu  $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ , współczynnik dyfuzji molekuł i jonów w roztworach wodnych  $D \sim 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ , więc  $Sc \sim 10^3$ . Przy wzroście lepkości współczynnik dyfuzji maleje zgodnie ze wzorem  $D = \text{const}/\nu$ , więc liczba  $Sc$  wzrasta proporcjonalnie do  $\nu^2$ .

## 5. Skale podobieństwa i wnioski podsumowujące

Liczby: Reynoldsa, Froude'a i Macha są najczęściej spotykanymi parametrami podobieństwa w mechanice płynów. Skale podobieństwa dla różnych wielkości, wynikające ze spełnienia tych liczb podobieństwa, są zestawione w Tab. 1. Umożliwiają one szybkie wyznaczenie skali podobieństwa (tj. stosunku: „prototyp podzielone przez model”) dla dowolnej pożądanej wielkości w przypadku, gdy dana liczba podobieństwa jest taka sama zarówno w prototypie jak i modelu. Obliczona skala podobieństwa daje oczywiście wiarygodne wyniki tylko w przypadku, jeśli na przepływ płynu ma dominujący wpływ poszczególne liczba podobieństwa.

Na zakończenie rozważań dotyczących stosunków sił jako kryteriów podobieństwa dynamicznego zjawisk mechanicznych, można sformułować następujące podsumowujące konkluzje [1–4]:

1. Otrzymane kryteria podobieństwa umożliwiają nam wykonanie badań modelowych używając powszechnie występujące płyny jak woda i powietrze, a następnie przenieść otrzymane wyniki badań na płyny, które są mniej używane powszechnie jak gaz, para wodna, olej itp.
2. W hydraulice, aerodynamice i aeronautyce, można otrzymać wartościowe rezultaty minimalizując koszty badań, wykonując testy na modelach małej skali urządzeń czy aparatury pełnej skali. Prawa podobieństwa umożliwiają wyznaczenie podstawowych właściwości i charakterystyk prototypu, a więc urządzenia / konstrukcji pełnej skali, z testów wykonanych na modelu. Niekoniecznie należy używać takich samych płynów dla modelu i prototypu. Model nie musi też być zawsze mniejszy niż jego prototyp. I tak np. w przypadku małej pompy odśrodkowej z wodą na wlocie do pompy, można przeprowadzić badania modelowe z powietrzem na wlocie do modelu tej pompy wykonanej w dużej skali. Należy także podkreślić, że model nie musi być koniecznie wykonany w innej skali niż prototyp. W rzeczywistości może to być to samo urządzenie, ale badane przy innych prędkościach innego płynu, który ma znacząco różne właściwości fizyczne niż płyn rzeczywisty.
3. Badania modelowe mogą być stosowane w wielu interdyscyplinarnych zagadnieniach szeroko rozumianej mechaniki stosowanej ciał stałych i płynów, np.: statków w basenach holowniczych, samolotów w tunelach aerodynamicznych, turbin wiatrowych i wodnych, pomp odśrodkowych, maszyn przepływowych, przelewów spływowych zapór, kanałów rzecznych, działania fal i pływów na plażach, erozji gruntu, transportu cząstek stałych, osadów, zawiesin oraz wielu innych.
4. W badaniach modelowych dotyczących przepływów płynów, fundamentalnym zagadnieniem jest uwzględnienie turbulencji w płynie. Jeśli więc prędkości płynu w badaniach modelowych są zbyt małe i dominuje ruch laminarny zamiast turbulentnego, wyniki badań będą obarczone dużymi błędami. Ważnym zagadnieniem, także związanym z turbulencją, jest właściwe zamodelowanie chropowatości powierzchni kontaktowych płynu z ciałem stałym. Ponadto, w badaniach modelowych



należy zapewnić właściwą geometrię w przepływie płynu, tak by wyeliminować wpływ napięć powierzchniowych płynu tam, gdzie one nie są istotne. Na przykład, głębokość wody przepływającej przez grzbiet modelu przelewu sphywowego nie może być zbyt mała.

Tabela 1. Charakterystyczne wielkości w mechanice płynów i związane z nimi skale podobieństwa (tj. stosunki wielkości w prototypie do odpowiadających im wielkości w modelu) [2]

Charakterystyczna wielkość	Wymiar w bazie wymiarowej (L,M,T)	Skale podobieństwa wynikające z liczb podobieństwa		
		Reynoldsa	Froude'a	Macha
Geometryczna:				
Długość	$[L]^1$	$k_D$	$k_D$	$k_D$
Pole	$[L]^2$	$k_D^2$	$k_D^2$	$k_D^2$
Objętość	$[L]^3$	$k_D^3$	$k_D^3$	$k_D^3$
Kinematyczna:				
Czas	$[T]^1$	$k_D^2 k_\rho$	$k_D^{\frac{1}{2}} k_g^{-\frac{1}{2}}$	$k_D k_\rho^{\frac{1}{2}} k_K^{-\frac{1}{2}}$
Prędkość	$[L]^1 [T]^{-1}$	$\frac{k_\mu}{k_D k_\rho}$	$k_D^{\frac{1}{2}} k_g^{\frac{1}{2}}$	$k_K^{\frac{1}{2}} k_\rho^{-\frac{1}{2}}$
Przyspieszenie	$[L]^1 [T]^{-2}$	$\frac{k_\mu^2}{k_\rho^3 k_D^3}$	$k_g$	$k_K k_D^{-\frac{1}{2}} k_\rho^{-\frac{1}{2}}$
Wydatek objętościowy/ natężenie wpływu	$[L]^3 [T]^{-1}$	$\frac{k_D k_\mu}{k_\rho}$	$k_D^{\frac{5}{2}} k_g^{\frac{1}{2}}$	$k_D^2 k_K k_\rho^{-\frac{1}{2}}$
Dynamiczne:				
Masa	$[M]^1$	$k_D^3 k_\rho$	$k_D^3 k_\rho$	$k_D^3 k_\rho$
Siła	$[M]^1 [L]^1 [T]^{-2}$	$\frac{k_\mu^2}{k_\rho}$	$k_D^3 k_\rho k_g$	$k_D^2 k_K$
Ciśnienie	$[M]^1 [L]^{-1} [T]^{-2}$	$\frac{k_\mu^2}{k_D^2 k_\rho}$	$k_D k_\rho k_g$	$k_K$
Impuls i pęd	$[M]^1 [L]^1 [T]^{-1}$	$k_D^2 k_\mu$	$k_D^{\frac{7}{2}} k_\rho^{\frac{1}{2}} k_g^{\frac{1}{2}}$	$k_D^3 k_\rho^{\frac{1}{2}} k_K^{\frac{1}{2}}$
Energia i praca	$[M]^1 [L]^2 [T]^{-2}$	$\frac{k_D k_\mu^2}{k_\rho}$	$k_D^4 k_\rho k_g$	$k_D^3 k_K$
Moc	$[M]^1 [L]^2 [T]^{-3}$	$\frac{k_\mu^3}{k_D k_\rho^2}$	$k_D^{\frac{7}{2}} k_\rho^{\frac{3}{2}} k_g^{\frac{3}{2}}$	$k_D^2 k_K k_\rho^{-\frac{1}{2}}$

Uwaga: Zwykle jest takie samo w modelu i prototypie, więc  $k_g=1$

## Literatura

- [1] Flaga A. *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*. Arkady, Warszawa 2008.
- [2] Daugherty R.L., Franzini J.B. *Fluid Mechanics with engineering applications*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1977.
- [3] Gryboś R. *Podstawy mechaniki płynów. Część I i II*. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [4] Flaga A. *Basic principles and theorems of dimensional analysis and the theory of model similarity of physical phenomena*. Technical Transactions, Civil Engineering, 2-B/2015, 241–272.

# Ratios of forces and forces moments as dynamic similarity criteria of various phenomena occurring in wind engineering, snow engineering and fluid dynamics

## Part II – Unsteady problems of periodic, quasi-periodic and turbulent character

**Andrzej Flaga**

*Faculty of Civil Engineering, Institute of Structural Mechanics, Cracow University of Technology  
e-mail: liwpk@windlab.pl*

**Abstract:** The work concerns dynamic similarity criteria of various phenomena occurring in wind engineering, snow engineering and fluid dynamics derived from ratios of forces and forces moments affecting these phenomena. Derived and analyzed in part II dynamic similarity criteria, mainly concern the following unsteady problems of periodic, quasi-periodic and turbulent character: 1. Vibrations of a solid in a stationary and moving fluid; 2. Snow particles/flakes/clusters breaking off the outer layer of the snow deposit; 3. Rotating turbines, propellers or screw propellers.

**Keywords:** dynamic similarity criteria, wind engineering, snow engineering, fluid dynamics, steady problems.

## **Badania modeli aeroelastycznych przewodów linii wysokiego napięcia dla różnych przypadków ich ośnieżenia i oblodzenia**

**Andrzej Flaga, Łukasz Flaga, Piotr Krajewski, Aleksander Pistol**

*Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej  
Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej  
e-mail: liwpk@windlab.pl; lukasz.flaga@interia.pl; piotrekrajewski@gmail.com;  
aleksander.pistol@pk.edu.pl*

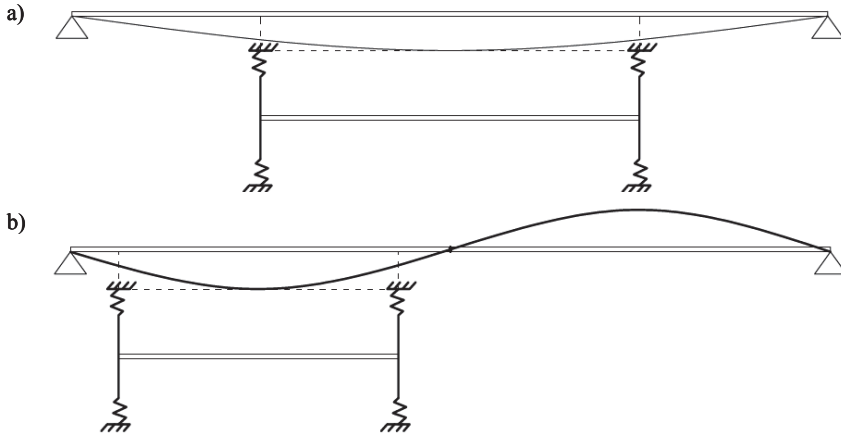
**Streszczenie:** W pierwszej części pracy wyprowadzono kryteria podobieństwa dla badań modeli aeroelastycznych odwzorowujących przewody linii wysokiego napięcia. Kryteria te uwzględniają drgania przewodów przy występowaniu zjawisk aeroelastycznych: wzbudzenia wirowego, galopowania oraz interferencji i drgania w śladzie aerodynamicznym innych przewodów. Druga część pracy przedstawia przeprowadzone w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej badania modeli aeroelastycznych wiązki trzech przewodów linii wysokiego napięcia. Badania te miały na celu identyfikację drgań aeroelastycznych spowodowanych wzajemną interferencją przewodów, a w szczególności wyznaczenie prędkości krytycznej dla galopowania przewodów dla wybranych przypadków ośnieżenia i oblodzenia przewodów.

**Słowa kluczowe:** inżynieria wiatrowa; badania modelowe; model aeroelastyczny; linie wysokiego napięcia; oblodzenie; pokrywa śnieżna.

### **1. Podstawowe cechy modelu sekcyjnego przewodu linii napowietrznej**

Ze względu na znaczne stosunki rozpiętości przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych do wymiarów ich przekrojów poprzecznych oraz względną niezmiennosc tych elementów na długości, w badaniach stosuje się tzw. modele sekcyjne. Powstają one z dowolnego wycinka przewodu na długości, w pewnej odległości od słupów, gdzie pomijalny jest wpływ samego zamocowania. Tego typu rozwiązanie wymaga jednak zastosowania specjalnych warunków brzegowych, które oddadzą wpływ zachowania pozostałej części przewodu w warunkach modelowych. Pozwala ono jednak na oddanie elementu w dużej skali w modelu, dzięki czemu łatwiej o spełnienie wymaganych kryteriów podobieństwa.

Model sekcyjny danego obiektu smukłego jest z reguły sztywnym elementem smukłym podpartym sprężystością na końcach, z dodanymi także na końcach elementami tłumiącymi drgania oraz tarczami eliminującymi w znacznej części niepożądane zaburzenia brzegowe. W analizowanym przypadku stopień swobody skrętnej przewodu jest mało istotny, stąd rozważany model powinien mieć dwa stopnie swobody dynamicznej umożliwiające drgania poprzeczne przewodu. Długość modelu sekcyjnego powinna być taka, aby jego dwie postaci drgań własnych poprzecznych niewiele odbiegały od dominujących w danym przypadku postaci drgań własnych rzeczywistego przewodu (por. rys. 1).



Rys. 1. Poglądowe przedstawienie postaci drgań własnych układu rzeczywistego i odpowiadających im modeli sekcyjnych: a) symetrycznej; b) antysymetrycznej

Rozważany model sekcyjny  $i$ -tego przewodu wiązki powinien umożliwić zbadanie następujących typów drgań przewodu:

- Drgania wzbudzone wirami o dominującej częstotliwości tych drgań  $f_i^v$ ;
- Drgania typu galopowania o dominującej częstotliwości tych drgań  $f_i^g$ ;
- Drgania w śladzie aerodynamicznym pozostałych przewodów wiązki o dominującej częstotliwości tych drgań  $f_i^a$ .

Wynika z tego, że sztywności sprężyn podpierających elastycznie końce modeli sekcyjnych trzech przewodów wiązki muszą mieć możliwość regulacji.

Ponadto powinien być wzięty pod uwagę fakt, że drgania odbywają się zawsze wokół tzw. położenia równowagi statycznej. Położenie równowagi statycznej przewodów jest uzależnione od oddziaływań statycznych (ciężar własny, oblodzenie, szadź, temperatura, napięcie wstępne) i quasi-statycznych (oddziaływanie średniego wiatru) tych przewodów. Także i z tego powodu parametry mechaniczne modeli przewodów danej wiązki powinny się zmieniać dla różnych kombinacji tych oddziaływań.

Przykładowo, gdy wiatr przemieści  $i$ -ty przewód, główne osie jego sztywności poprzecznej  $x_i^*$  i  $z_i^*$  będą obrócone względem osi  $x_i$  i  $z_i$  układu lokalnego przewodu o jakiś kąt  $\beta$  (por. rys. 2). Wówczas, zgodnie z tym rysunkiem, siły sprężyste wynikające z przemieszczeń przewodu  $\xi_i$  i  $\zeta_i$ , odpowiednio w kierunkach  $x_i$  i  $z_i$ , wyniosą odpowiednio:

Przy przemieszczeniu więzy 1 o  $\xi_i$ :

$$S_{xi}^{\xi} = -2(k_{xi}^* \cos^2 \beta + k_{zi}^* \sin^2 \beta) \xi_i = -k_{xxi} \xi_i \quad (1)$$

$$S_{zi}^{\xi} = -2(k_{xi}^* \cos \beta \sin \beta - k_{zi}^* \cos \beta \sin \beta) \xi_i = -k_{zxi} \xi_i \quad (2)$$

Przy przemieszczeniu więzy 2 o  $\zeta_i$ :

$$S_{xi}^{\zeta} = -2(k_{xi}^* \cos \beta \sin \beta - k_{zi}^* \cos \beta \sin \beta) \zeta_i = -k_{xzi} \zeta_i \quad (3)$$

$$S_{zi}^{\zeta} = -2(k_{xi}^* \sin^2 \beta + k_{zi}^* \cos^2 \beta) \zeta_i = -k_{zzi} \zeta_i \quad (4)$$

Przy łącznym przemieszczeniu obu więzów:

$$S_{xi} = S_{xi}^{\xi} + S_{xi}^{\zeta} = -k_{xxi}\xi_i - k_{xzi}\zeta_i \quad (5)$$

$$S_{zi} = S_{zi}^{\xi} + S_{zi}^{\zeta} = -k_{zxi}\xi_i - k_{zzi}\zeta_i \quad (6)$$

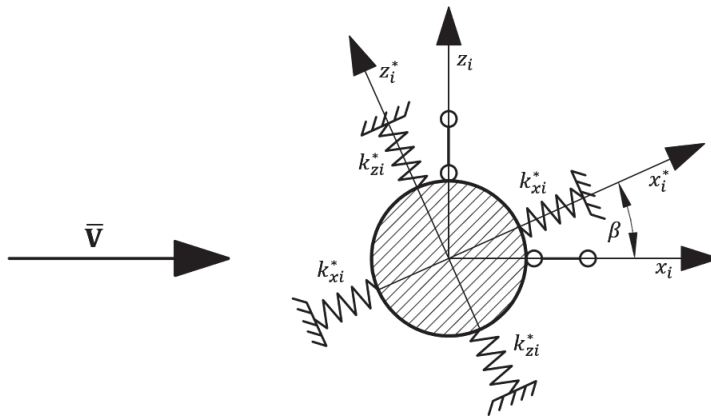
Stąd macierz sztywności  $\mathbf{K}_i$  rozważanego układu ma postać:

$$\mathbf{K}_i = 2 \begin{bmatrix} k_{xi}^* \cos^2 \beta + k_{zi}^* \sin^2 \beta; & (k_{xi}^* - k_{zi}^*) \cos \beta \sin \beta \\ (k_{xi}^* - k_{zi}^*) \cos \beta \sin \beta; & (k_{xi}^* \sin^2 \beta + k_{zi}^* \cos^2 \beta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Częstości kołowe drgań własnych  $\omega_{xi}^*$  i  $\omega_{zi}^*$  (lub częstotliwości  $f_{xi}^*$  i  $f_{zi}^*$ ) układu jak na rys. 2 wyniosą odpowiednio:

$$\omega_{xi}^* = 2\pi f_{xi}^* = \sqrt{\frac{2k_{xi}^*}{m_i l_i}}, \quad \omega_{zi}^* = 2\pi f_{zi}^* = \sqrt{\frac{2k_{zi}^*}{m_i l_i}} \quad (8)$$

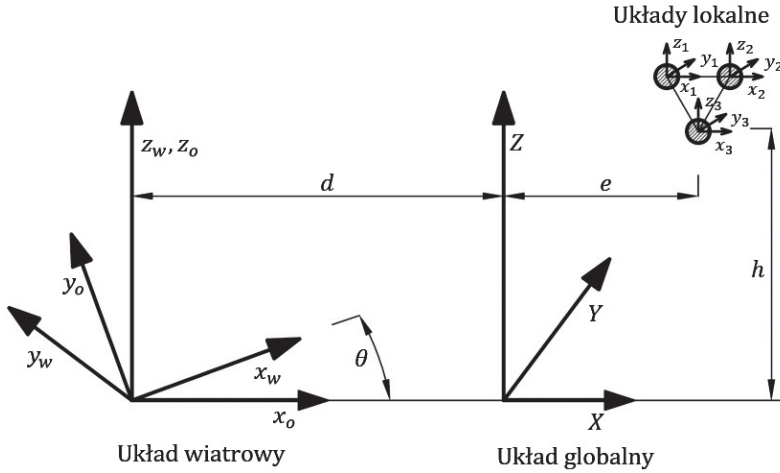
gdzie  $m_i$  – masa na jednostkę długości modelu i-tego przewodu,  $l_i = l$  – długość modelu i-tego przewodu. Przyjmując jako dane wyjściowe  $\omega_{xi}^*$ ,  $\omega_{zi}^*$ ,  $m_i$  i  $l_i$ , można obliczyć z powyższych wzorów sztywności sprężyn  $k_{xi}^*$  i  $k_{zi}^*$ .



Rys. 2. Główne osie sztywności i-tego przewodu. Płaszczyzna  $y_i^* z_i^*$  jest płaszczyzną zwisu przewodu

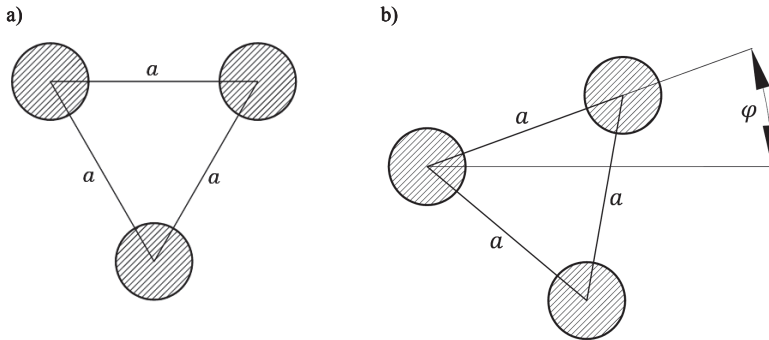
## 2. Zbiór współrzędnych i parametrów geometrycznych określających położenie punktów i geometrię wyjściową zagadnienia gdy chodzi o obiekt i wejście

Relacja między układami współrzędnych, tj. układem wiatrowym  $x_w y_w z_w$  – używanym do opisu pola prędkości wiatru przed przewodami – układem globalnym  $XYZ$  – w którym opisuje się konfigurację początkową i aktualną badanego obiektu – i układami lokalnymi  $x_i y_i z_i$ ;  $i = 1, 2, 3$  – związanymi z konfiguracją poszczególnych przewodów – przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Relacje między układami współrzędnych

Najczęściej rozważa się przypadek, gdy:  $a = b = c$ , przy czym możliwe są dwie racjonalne sytuacje przedstawione na rys. 4: wiązka nieobrócona i wiązka obrócona o kąt  $\varphi$  w płaszczyźnie  $XZ$ .



Rys. 4. Dwie sytuacje usytuowania wiązki przewodów: a) wiązka nieobrócona; b) wiązka obrócona

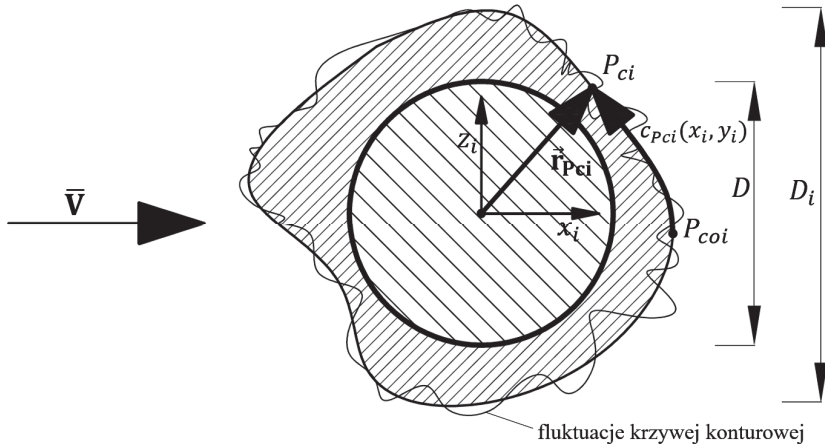
Współrzedną krzywoliniową  $c_i(x_i, z_i)$  opisującą uśredniony kontur przekroju poprzecznego przewodu oraz rzeczywiste fluktuacje krzywej konturowej, jak również charakterystyczny wymiar przekroju poprzecznego przewodu  $D_i$ , przedstawia rys. 5. Zewnętrzny kontur i wymiar charakterystyczny przekroju poprzecznego przewodu bez oblodzenia czy szadzi tj.  $D$  jest oczywiście inny niż w przypadku jego oblodzenia czy pokrycia szadzią, tj.  $D_i$ .

Miarą fluktuacji rzeczywistej krzywej konturowej  $c_{ri}$  wokół uśrednionej krzywej konturowej  $c_i$  może być bezwymiarowy parametr szorstkości powierzchni zewnętrznej przewodu  $k_{ri}$  zdefiniowany jako:

$$k_{ri} = \frac{\sigma_{cri}}{D} \quad (9)$$

gdzie:  $\sigma_{cri}$  – odchylenie standardowe fluktuacji krzywej wokół krzywej.





Rys. 5. Wymiar charakterystyczny  $D_i$ , krzywa konturowa uśredniona i z fluktuacjami przekroju poprzecznego przewodu oraz współrzędna krzywoliniowa  $c_{Pci}$  i wektor wodzący  $\vec{r}_{Pci}$  dowolnego punktu  $P_{ci}$  uśrednionej krzywej konturowej  $c$

### 3. Zbiory najważniejszych wielkości fizycznych i geometrycznych (zmiennych niezależnych i zależnych oraz parametrów), które należy uwzględnić w opisie i badaniach analizowanego zagadnienia

- Zbiór wielkości wejściowych opisujących napływające powietrze:

$$W = \{\rho, \nu, V, I_v, \theta\} \quad (10)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość powietrza atmosferycznego (w przybliżeniu  $\rho = 1,25 \frac{kg}{m^3}$ );  $\nu$  – lepkość kinematyczna powietrza;  $V$  – prędkość średnia, referencyjna (odniesienia) wiatru na wysokości przewodu  $h$ , która może być opisana wzorem potęgowym:

$$V = V(h) = V(10) \left( \frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (11)$$

gdzie:  $\alpha$  – wykładnik w prawie potęgowym pionowego profilu wiatru zależny od kategorii chropowatości terenu;  $I_v$  – intensywność turbulencji na wysokości nad terenem;  $\theta$  – średni kąt natarcia wiatru;

- Zbiór współrzędnych przestrzenno-czasowych i wielkości geometrycznych

$$G = \{x, y, z, \theta; X, Y, Z; x_i, y_i, z_i; c_i; d, e, h; a, b, c, \varphi; D, D_i, k_{ri}; t\}; \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

gdzie:  $t$  – czas, natomiast pozostałe wielkości opisano wcześniej;

- Zbiór wielkości mechanicznych charakteryzujących badany obiekt, tj. wiązkę przewodów

$$O = \{m_i, f_{xi}^*, f_{zi}^*, \beta, \gamma_{xi}^*, \gamma_{zi}^*; l\}; \quad i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

gdzie:  $m_i$  – masa na jednostkę długości przewodu;  $f_{xi}^*, f_{zi}^*$  – częstotliwości drgań własnych dominujących w badaniach określonych drgań wymuszonych (wzbudzenie wirowe, galopowanie, interferencja w śladzie aerodynamicznym);  $\beta$  – kąt obrotu płaszczyzny zwisu cięga przy oddziaływaniu quasi-statycznym wiatru;  $\gamma_{xi}^*, \gamma_{zi}^*$  – stopnie tłumienia (ułamki tłumienia krytycznego) w badaniach określonych drgań wymuszonych);  $l$  – długość modelu;

– Zbiór wielkości wyjściowych

$$\{OU\} = \{\xi_i, \zeta_i; \dot{\xi}_i, \dot{\zeta}_i; \ddot{\xi}_i, \ddot{\zeta}_i\}; i = 1, 2, 3 \quad (14)$$

gdzie:  $\xi_i, \zeta_i; \dot{\xi}_i, \dot{\zeta}_i; \ddot{\xi}_i, \ddot{\zeta}_i$  – składowe odpowiednio przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń badanych drgań przewodów.

W powyższych zbiorach różnych wielkości fizycznych czy geometrycznych, kilka z nich jest już wielkościami bezwymiarowymi, tj.: wszystkie kąty wyrażone w radianach ( $\theta, \varphi, \beta$ ); współczynnik szorstkości powierzchni ( $k_{ri}$ ); współczynniki tłumienia ( $\gamma_{xi}^*, \gamma_{zi}^*$ ), intensywność turbulencji ( $I_v$ ) i współczynnik chropowatości terenu ( $\alpha$ ). Jako takie stanowią kryteria podobieństwa analizowanego zagadnienia.

#### 4. Baza wymiarowa i kryteria podobieństwa dla pozostałych wielkości fizycznych i geometrycznych

Jako bazę wymiarową zagadnienia przyjęto zbiór trzech następujących wielkości:

$$B = \{\rho, V, D\} \quad (15)$$

gdzie:  $D$  – średnica nominalna przewodu nieoblodzonego.

Z pozostałych wielkości wymiarowych występujących w przedstawionych wcześniej zbiorach można utworzyć następujące wielkości bezwymiarowe:

– Liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (16)$$

– Bezwymiarowe współrzędne i bezwymiarowe parametry geometryczne:

$$\check{x} = \frac{x}{D}; \check{y} = \frac{y}{D}; \check{z} = \frac{z}{D} \quad (17)$$

$$\check{X} = \frac{X}{D}; \check{Y} = \frac{Y}{D}; \check{Z} = \frac{Z}{D} \quad (18)$$

$$\check{x}_i = \frac{x_i}{D}; \check{y}_i = \frac{y_i}{D}; \check{z}_i = \frac{z_i}{D} \quad (19)$$

$$\check{c}_i = \frac{c_i}{D} \quad (20)$$

$$\check{d} = \frac{d}{D}; \check{e} = \frac{e}{D}; \check{h} = \frac{h}{D}; \check{\alpha} = \frac{\alpha}{D}; \quad (21)$$

$$\check{D}_i = \frac{D_i}{D} \quad (22)$$

– Czas bezwymiarowy

$$\check{t} = \frac{V}{D} t \quad (23)$$

– Bezwymiarowy parametr masy

$$M_{\rho i} = \frac{\rho D^2}{2m_i} \quad (24)$$

– Kinematyczne liczby Strouhala

$$St_{xi}^* = \frac{f_{xi}^* D}{V}; \quad St_{zi}^* = \frac{f_{zi}^* D}{V} \quad (25)$$

– Smukłość modelu

$$\lambda = \frac{l}{D} \quad (26)$$

Bezwymiarowe wielkości wyjścia

$$\check{\xi}_i = \frac{\xi_i}{D}; \quad \check{\xi}_i = \frac{\dot{\xi}_i}{V}; \quad \check{\xi}_i = \frac{\ddot{\xi}_i D}{V^2} \quad (27)$$

$$\check{\zeta}_i = \frac{\zeta_i}{D}; \quad \check{\zeta}_i = \frac{\dot{\zeta}_i}{V}; \quad \check{\zeta}_i = \frac{\ddot{\zeta}_i D}{V^2} \quad (28)$$

Z uogólnionego twierdzenia analizy wymiarowej i teorii podobieństwa zjawisk fizycznych wynika, że (por. [3], [4], [9], [10]), że przy spełnieniu kryteriów podobieństwa dotyczących wielkości wejściowych IN i obiektu O pomierzone w badaniach modelowych wielkości bezwymiarowe wyjścia OU powinny być – przy uczynionych założeniach upraszczających odnośnie samego modelu – takie same jak w badaniach w skali naturalnej.

## 5. Skale podobieństwa analizowanego zagadnienia i problemy ich spełnienia

Z liczb kryterialnych wynikają określone skale podobieństwa wielkości fizycznych czy geometrycznych występujących w tych liczbach kryterialnych. Ponieważ baza wymiarowa jest tu trójelementowa – niezależnych skali podobieństwa jest również trzy.

Skale podobieństwa pozostałych wielkości wymiarowych zależą od skali podobieństwa trzech wybranych wielkości bazowych, które mogą stanowić bazę wymiarową. Rozważmy to zagadnienie bardziej szczegółowo. Skalę dowolnej wielkości oznaczono dalej  $k_q$ .

– Relacje dla skali podobieństwa wynikające z liczby Reynoldsa  $Re$ :

$$k_V k_D k_\nu = 1$$

Ponieważ w badaniach  $k_V = 1$ , więc:

$$k_V k_D = 1; k_V = k_D^{-1} \quad (29)$$

– Relacje dla skali podobieństwa wynikające z bezwymiarowych wielkości geometrycznych:

$$k_x k_D^{-1} = 1; k_x = k_D; \dots; k_{ci} k_D^{-1} = 1; k_c = k_D; k_L = k_D; k_{Di} = k_D \quad (30)$$

W dalszych rozważaniach zakłada się, że model obiektu jest podobny geometrycznie do obiektu rzeczywistego, czyli wszystkie skale podobieństwa geometrycznego są spełnione.

– Relacje dla skali podobieństwa wynikające z bezwymiarowego czasu  $\check{t}$ :

$$k_V k_t k_D^{-1} = 1; k_t = \frac{k_D}{k_V} \quad (31)$$

– Relacje dla skali podobieństwa wynikające z bezwymiarowego parametru masy  $M_{\rho i}$ :

$$k_\rho k_D^2 k_{mi}^{-1} = 1; k_{mi} = k_\rho k_D^2 \quad (32)$$

Ponieważ w badaniach  $k_\rho = 1$ , więc:

$$k_{mi} = k_D^2 \quad (33)$$

Relacje dla skali podobieństwa wynikające z kinematycznych liczb Strouhala  $St_{xi}^*$  i  $St_{zi}^*$ :

$$k_{f_{xi}}^* k_D k_V^{-1} = 1; k_{f_{xi}}^* = k_V k_D^{-1} \quad (34)$$

$$k_{f_{zi}}^* k_D k_V^{-1} = 1; k_{f_{zi}}^* = k_V k_D^{-1} \quad (35)$$

Relacje dla skali podobieństwa wynikające z bezwymiarowych wielkości wyjścia:

$$k_{\xi i} k_D^{-1} = 1; k_{\xi i} = k_D; k_{\zeta i} = k_D \quad (36)$$

$$k_{\xi i}^* k_V^{-1} = 1; k_{\xi i}^* = k_V; k_{\zeta i} = k_V \quad (37)$$

$$k_{\xi i} k_D k_V^{-2} = 1; k_{\xi i} = k_V^2 k_D^{-1}; k_{\zeta i} = k_V^2 k_D^{-1} \quad (38)$$

Ponieważ przyjęto już dwie skale wielkości wymiarowej, a mianowicie  $k_\rho = 1$ ,  $k_V = 1$ , można więc przyjąć dowolnie jeszcze jedną skalę podobieństwa np.  $k_D$ . Pozostałe skale podobieństwa będą uzależnione od tych trzech. Rozważmy dwa przypadki szczególne skali podobieństwa geometrycznego  $k_D$ :

– Przypadek 1:  $k_D = 1$

Z kryteriów podobieństwa wynika, że teoretycznie rzecz biorąc pozostałe skale podobieństwa powinny też być równe jedności.

– Przypadek 2:  $k_D \neq 1$  (np.  $k_D = 2$ ).

Wówczas będzie:

$$k_V = k_D^{-1} \quad (k_V = 0,5)$$

$$k_t = k_D k_V^{-1} = k_D^2 \quad (k_t = 4)$$

$$k_{mi} = k_D^2 \quad (k_{mi} = 4)$$

$$k_{fxi}^* = k_{fzi}^* = k_V k_D^{-1} = k_D^{-2} \quad (k_{fxi}^* = k_{fzi}^* = 0,25)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_D \quad (k_{\xi i} = k_{\zeta i} = 2)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_V \quad (k_{\xi i} = k_{\zeta i} = 0,5)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_V^2 k_D^{-1} = k_D^{-3} \quad \left( k_{\xi i} = k_{\zeta i} = \frac{1}{8} \right)$$

Współczynniki aerodynamiczne sił i momentu aerodynamicznego – a stąd i same siły i moment aerodynamiczny działające na przewody wiązki – w ogólności jak wiadomo mogą zależeć od liczby Reynoldsa  $Re$ . W rozważanym przypadku jest to przedział zakresu podkrytycznego liczby  $Re$  znajdujący się dużo poniżej tzw. zakresu krytycznego i oczywiście nadkrytycznego tej liczby. W rozpatrywanym przedziale zakresu podkrytycznego można z dobrym przybliżeniem założyć, że wartości oddziaływań aerodynamicznych na przewody wiązki nie zmieniają się przy zmianie wartości liczby  $Re$  w tym przedziale. Zatem niekoniecznie trzeba respektować kryterium i skalę podobieństwa wynikające z tej liczby. Można więc założyć arbitralnie skalę podobieństwa  $k_D = 1$  i  $k_V \neq 1$  i rozpatrzeć trzeci przypadek pozostałych skali podobieństwa:

– Przypadek 3:  $k_D = 1$  i  $k_V \neq 1$  ( $k_V \neq k_D^{-1}$  np.  $k_D = 1$ ,  $k_V = 0,5$ )

Wówczas będzie:

$$k_t = k_D k_V^{-1} \quad (k_t = 2)$$

$$k_{mi} = k_D^2 \quad (k_{mi} = 1)$$

$$k_{fxi}^* = k_{fzi}^* = k_V k_D^{-1} = k_D^{-2} \quad (k_{fxi}^* = k_{fzi}^* = 0,5)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_D \quad (k_{\xi i} = k_{\zeta i} = 1)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_V \quad (k_{\xi i} = k_{\zeta i} = 0,5)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_V^2 k_D^{-1} = k_D^{-3} \quad (k_{\xi i} = k_{\zeta i} = 0,25)$$

Warto tu z naciskiem podkreślić, że wszystkie pozostałe skale podobieństwa związane z wielkościami bezwymiarowymi występującymi w zbiorach wielkości charakteryzujących analizowane zagadnienie (zjawisko fizyczne) powinny być równe jedności.

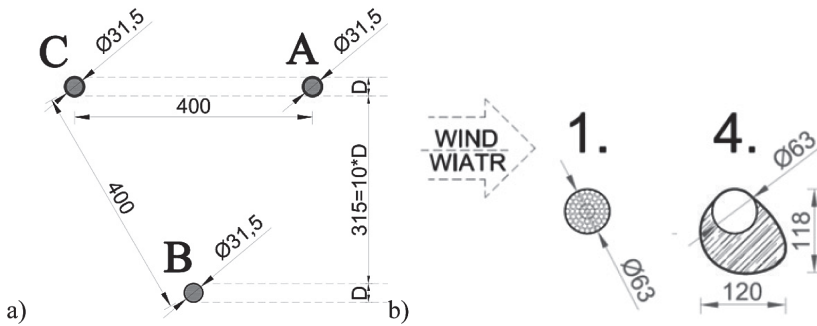
## 6. Szczegółowy opis modelu aeroelastycznego

Aeroelastyczny model sekcyjny składa się z trzech przewodów. Ich układ pokazano na rys. 6a i 7. Podstawę każdego z modeli stanowi rura aluminiowa o średnicy 30 mm i grubości ścianki 2 mm. W celu odwzorowania dynamicznego zachowania wiązki przewodów, końce rur zostały podwieszane sprężysto przy pomocy systemu sprężyn i linek stalowych o grubości

0.6 mm (por. rys. 8 i rys. 9). Każda z linek przechodziła przez jedną rolę o bardzo niskim współczynniku tarcia w celu wyeliminowania ich wzajemnej kolizji (por. rys. 9a). Przemieszczenia przewodów wzdłuż ich osi podłużnej (osi  $z$ ) zostały ograniczone przy pomocy dysków. W celu zminimalizowania wpływu uderzania przewodów o te dyski zastosowano tłumiki z miękkiej gąbki zakończone elementem punktowym oraz dyski o bardzo niskim współczynniku tarcia (por. rys. 9c).

Ze względu na bardzo wysoki stopień złożoności badań aeroelastycznych, w badaniach uwzględniono dwa przekroje przewodów, zestawione na rys. 6b: podstawowego przewodu bez wpływu czynników atmosferycznych (przypadek 1) oraz przewodu pokrytego grubą powłoką śnieżną nagromadzoną na skutek silnych wiatrów powodujących obrót przewodu wokół jego osi podłużnej (przypadek 4). Przypadek 1 wybrano jako podstawowy, a przypadek 4 jako potencjalnie najbardziej niestabilny aerodynamicznie.

Na końcu każdego modelu sekcyjnego zamontowano okrągłe tarcze w celu redukcji wpływu zaburzeń brzegowych (por. rys. 8a i rys. 9b). Parametry modeli aeroelastycznych oraz warunki, w jakich przeprowadzono badania, zostały ustalone na podstawie wyprawdzonych kryteriów podobieństwa.

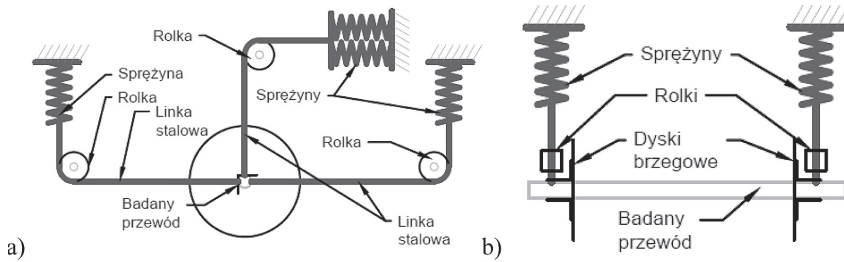


Rys. 6. Schemat wiązki przewodów i typów przekrojów: a) rzeczywiste wymiary wiązki [mm]; b) uwzględnione w badaniach typy przekrojów przewodów (wymiar w [mm])

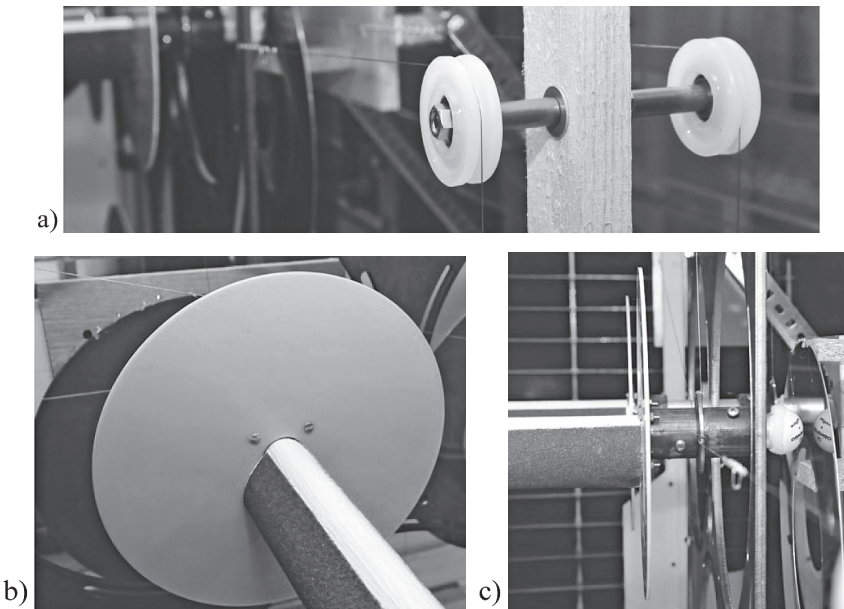


Rys. 7. Sekcyjny model aeroelastyczny w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego





Rys. 8. Schemat zamocowania przewodów: a) widok z boku; b) widok z przodu



Rys. 9. Detale modelu aeroelastycznego: a) rolka z naciągniętą linką; b) okrągły dysk brzegowy; c) element tłumiący zamocowany na obu końcach każdego z prętów (opisy w tekście)

## 7. Opis przeprowadzenia badań modeli aeroelastycznych

Składowe drgań przewodów w kierunku wiatru  $x$  oraz w kierunku pionowym poprzecznym do napływu wiatru  $y$  zostały zmierzone przy pomocy laserowych czujników odległości. Ustawienie tych czujników pozwalało na jednoczesne pomiary przemieszczeń końców przewodów A i C w kierunkach pionowym i poziomym. Wszystkie pomiary drgań zostały przeprowadzone przy ustalonym przepływie powietrza. Czas pojedynczego pomiaru wynosił 40 sekund.

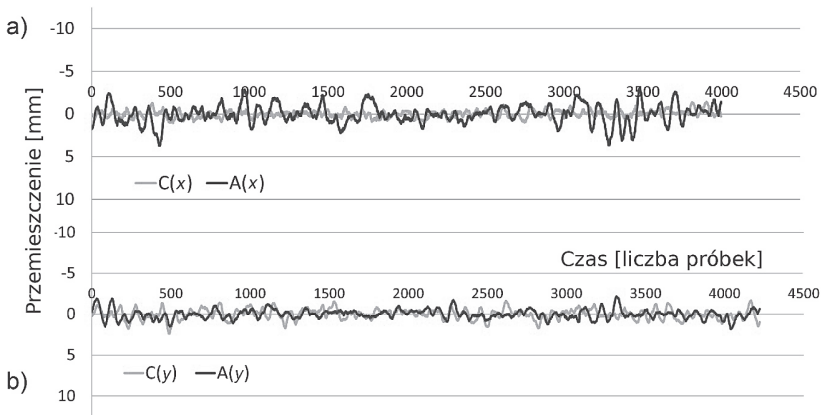
Pierwsza seria badań aeroelastycznych miała na celu wyznaczenie częstotliwości drgań własnych przewodów. Pomiary zostały przeprowadzone przy zerowej prędkości wiatru. Mierzono drgania po impulsowym wzbudzeniu przewodów. Po analizie sygnału za pomocą transformaty Fouriera częstotliwości własne przewodów oszacowano jako  $f = \text{Hz}$ .

Dla przypadku 1, pomiar przemieszczeń został przeprowadzony przy średnich prędkościach wiatru w zakresie  $\bar{v} = 8,0 \div 16,0 \text{ m/s}$  z krokiem  $1 \text{ m/s}$ . Prędkości powyżej

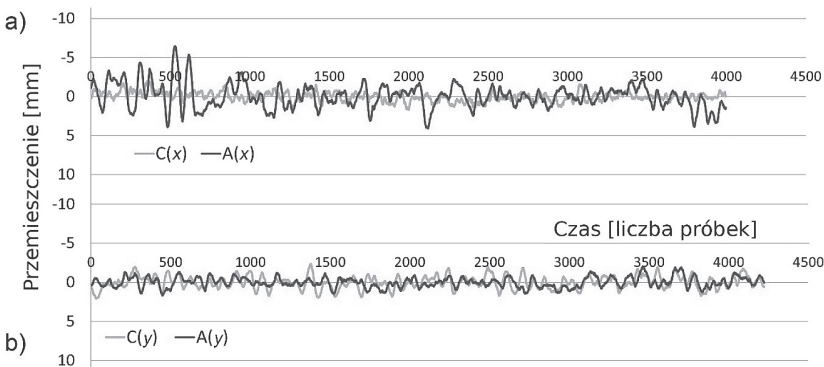
powodowały przemieszczenia wykraczające poza maksymalny zakres aparatury pomiarowej, stąd zaprzestano dalszego zwiększania prędkości. Porównania przemieszczeń przewodów 1A i 1C w kierunkach  $x$  i  $y$  przy prędkościach  $\bar{v} = 9,0$  m/s i  $\bar{v} = 11,0$  m/s zestawiono na rys. 10 i rys. 11.

Dla przypadku 4 przemieszczenia zostały zmierzone dla zakresu prędkości wiatru  $\bar{v} = 7,0 \div 17,0$  m/s z krokiem 1 m/s. Prędkości powyżej 17,0 m/s powodowały przemieszczenia wykraczające poza maksymalny zakres aparatury pomiarowej, stąd zaprzestano dalszego zwiększania prędkości.

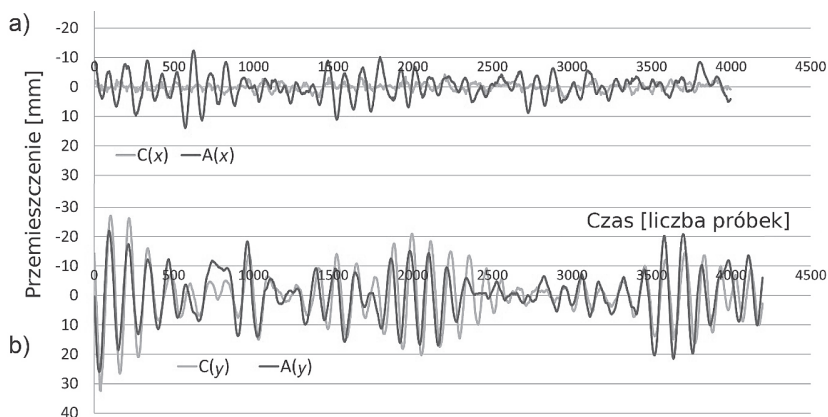
Podczas badań zaobserwowano wyraźne zjawisko galopowania przewodów przy prędkościach zbliżonych do 9,0 m/s. W związku z tym przeprowadzono dodatkowe badania dla prędkości 7,5 m/s, 8,5 m/s oraz 9,5 m/s. Porównania przemieszczeń przewodów 4A i 4C w kierunkach  $x$  i  $y$  przy prędkościach  $\bar{v} = 9,5$  m/s i  $\bar{v} = 11,0$  m/s zestawiono na rys. 12 i rys. 13.



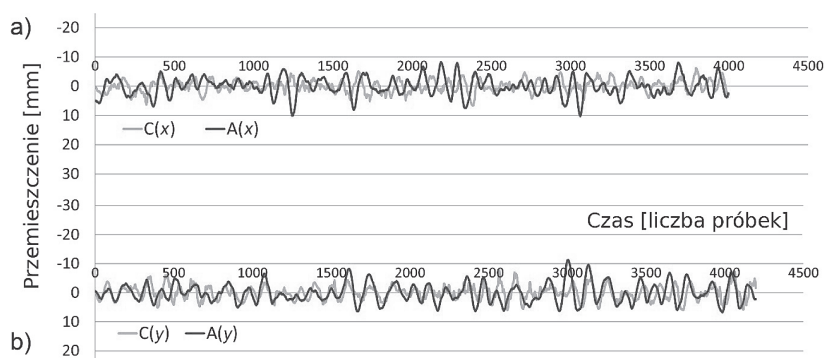
Rys. 10. Porównanie przemieszczeń przewodów 1A i 1C przy prędkości wiatru  $\bar{v} = 9,0$  m/s: a) w kierunku  $x$ ; b) w kierunku  $y$



Rys. 11. Porównanie przemieszczeń przewodów 1A i 1C przy prędkości wiatru  $\bar{v} = 11,0$  m/s: a) w kierunku  $x$ ; b) w kierunku  $y$



Rys. 12. Porównanie przemieszczeń przewodów 4A i 4C przy prędkości wiatru  $\bar{v} = 9,5$  m/s: a) w kierunku  $x$ ; b) w kierunku  $y$



Rys. 13. Porównanie przemieszczeń przewodów 4A i 4C przy prędkości wiatru  $\bar{v} = 11,0$  m/s: a) w kierunku  $x$ ; b) w kierunku  $y$

## 8. Analiza wyników badań modeli aeroelastycznych

Na podstawie porównania przemieszczeń sekcyjnych modeli aeroelastycznych przewodów 1A i 1C oraz przewodów 4A i 4C, sformułować można następujące wnioski:

### 1. Przypadek 1 dla przewodów A i C:

- Dla średnich prędkości wiatru w zakresie  $\bar{v} = 8,0 \div 16,0$  m/s nie zaobserwowano zjawiska galopowania przewodów;
- Przemieszczenia przewodu 1A były znacznie większe niż przewodu 1C – to charakterystyczna oznaka buffetingu;
- Drgania nie wykazywały oznak okresowości. Szybka transformata Fouriera pokazała, że drgania miały przebieg nieustalony;
- Prędkości wiatru powyżej 16,0 m/s powodowały przemieszczenia przewodów wykraczające poza maksymalny zakres aparatury pomiarowej. Z tego powodu zaprzestano dalszych badań.

2. Przypadek 4 dla przewodów A i C:
  - Dla średnich prędkości wiatru w zakresie  $\bar{v} = 7,0 \div 15,0$  m/s zaobserwowano zjawisko galopowania przewodów. Dotyczyło ono drgań pionowych (wzdłuż osi  $y$ ), zaś jego szczególne nasilenie zaobserwowano dla zakresu prędkości  $\bar{v} = 8,5 \div 9,5$  m/s. Z tego powodu prędkość  $\bar{v} = 9,0$  m/s może być uznana za prędkość krytyczną dla tego zjawiska;
  - Wykresy przemieszczeń dla prędkości  $\bar{v} = 15,0$  m/s również pokazują ich wzajemną korelację. Amplituda drgań jest jednak o wiele niższa niż w przypadku prędkości krytycznej.
3. Porównanie wyników dla przewodów A i C przed i po powstaniu pokrywy lodowo-śniegowej:
  - Pokrycie śniegiem lub lodem przewodów może drastycznie zmienić ich charakterystyki aerodynamiczne. Narastanie oblodzenia może sprawić, że cała wiązka przewodów stanie się niestabilna dynamicznie. Problem ten powinien być brany pod uwagę podczas projektowania energetycznych linii napowietrznych;
  - Dla przypadku 1 maksymalna amplituda drgań spowodowanych buffetingiem wyniosła 10 mm. Na skutek powstania pokrywy lodowej (przypadek 4), wartość ta wzrosła do ponad 30 mm. Można zatem zauważyć, że narastanie pokrywy lodowej prowadzi również do wzrostu maksymalnej amplitudy drgań.

## 9. Wnioski generalne i podsumowanie badań aeroelastycznych

Uzyskanie podczas badań laboratoryjnych na modelach sekcyjnych wiązki przewodów postaci i częstotliwości drgań odpowiadających rzeczywistym przewodom jest zadaniem niezwykle trudnym i pracochłonnym. Przeprowadzone badania pokazują, że różne zjawiska interferencji aeroelastycznej są możliwe do przewidzenia na podstawie badań tunelowych.

Zjawisko narastania śnieżno-lodowej pokrywy na przewodach znacznie wpływa na ich aerodynamiczne i aeroelastyczne charakterystyki, a w konsekwencji na bezpieczeństwo linii energetycznych. W związku z tym konieczne są dalsze, bardziej szczegółowe badania tego typu zjawisk. Takie badania powinny mieć na celu wyznaczenie możliwości pojawiania się zjawisk interferencji aeroelastycznych i prędkości krytycznej, przy której do nich dochodzi. Zakres tych badań powinien dotyczyć różnych częstotliwości drgań własnych przypadków oblodzenia przewodów oraz różnych prędkości średnich napływającego powietrza.

Porównanie wyników uzyskanych dla przewodów nawietrznych i zawietrznych potwierdza wcześniejsze przypuszczenia, że bardziej wrażliwe na zjawiska aeroelastyczne towarzyszące oblodzeniu i osnieżeniu przewodów są przewody zawietrzne.

### Podziękowania

Ten artykuł powstał dzięki wsparciu finansowemu z program GEKON, grant Nr GEKON1/O2/214108/19/2014.

### Literatura

- [1] Cosmai U., Van Dyke P., Mazzola L., Lillien J. *Conductor motions – Chapter 10*. Reference Work CIGRE Green Books, Francja 2014.
- [2] Farzaneh M. *Atmospheric icing of power networks*. (Ed.) Université du Québec à Chicoutimi, Kanada 2008.

- [3] Flaga A. *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*. Arkady, Warszawa 2008.
- [4] Flaga A. *Basic principles and theorems of dimensional analysis and theory of model similarity of physical phenomena*. 7<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Effects on Buildings and People: Actions, Influences, Interactions, Discomfort, Book of Keynote Lectures and Abstracts p. 49–62, 20–22 October, Cracow, 2014.
- [5] Hardy C. *Overhead conductor safe design tension with respect to aeolian vibrations*. Task Force B2.11.04 CIGRÉ 2005, IEEE/TPC Meeting Atlanta, January 2009 by Dave Havard.
- [6] Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U. *Conductor vibrations. Overhead power lines: planning, design, construction*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2003.
- [7] Lillien J. *State of the art of conductor galloping – A complementary document to transmission line reference book – wind-induced conductor motion, Chapter 4: Conductor galloping*, Technical Brochure CIGRE N° 322, Based on EPRI Research Project 792. Task Force B2.11.06, Francja 2007.
- [8] Mellor M. *Cold regions science and engineering Part III*, Section A3c: Blowing Snow. Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover New Hampshire 1965.
- [9] Siedov L.I. *Similarity and dimensional analysis in mechanics*. Academic Press, New York, USA, 1959.
- [10] Sonin A.A. *The physical basis of dimensional analysis*. Department of Mechanical Engineering MIT, Cambridge, UK, 2001.

### **Materiały wykorzystane w pracy**

- [11] PN-EN 1991-1-4 *Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–4. Oddziaływania ogólne - Oddziaływania wiatru*.
- [12] Raport Enion S.A. nt. sytuacji w zakresie dostaw energii elektrycznej na terenie Małopolski w związku z sytuacją pogodową w dniach 8.–25. stycznia 2010 r.

## **Wind tunnel tests of aeroelastic models of overhead transmission lines under different snow and ice covers**

**Andrzej Flaga, Łukasz Flaga, Piotr Krajewski, Aleksander Pistol**

*Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej  
Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej  
e-mail: liwpk@windlab.pl; lukasz.flaga@interia.pl;  
piotrekrajewski@gmail.com; aleksander.pistol@pk.edu.pl*

**Abstract:** In the first part of this paper, similarity criteria were elaborated for investigations of aeroelastic sectional models of high voltage line wires. These criteria consider wire vibrations caused by aeroelastic phenomena: vortex excitation, wake galloping and interference between the wires causing vibration in aerodynamic trace of other wires. Second part of the paper describes the tests conducted in Wind Engineering Laboratory of Cracow University of Technology. The subject of this set of tests was identification of aeroelastic vibrations caused by aeroelastic interference of wires, mainly determination of critical velocity of wires galloping and wake galloping for selected cases of snow and ice covers on the wires.

**Keywords:** wind engineering; model tests; aerodynamic model; transmission lines; icing; snow cover.





## Badanie wpływu dodatku granulatu gumowego na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody i mrozu

Damian Wiśniewski<sup>1</sup>, Milena Selke<sup>2</sup>, Anna Smolińska<sup>2</sup>, Mieczysław Słowik<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: damian.wisniewski@utp.edu.pl

<sup>2</sup> Sluchacz studiów II-go stopnia na kierunku budownictwo, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

<sup>3</sup> Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Lądowej, ul. Piotrowo 5, 61-138 Poznań, e-mail: mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań mieszanek mineralno-asfaltowych modyfikowanych dodatkiem granulatu gumowego metodą „na sucho”. Modyfikacja ta polegała na wprowadzeniu granulatu gumowego do mieszanki kruszywa, zastępując część kruszywa bazaltowego o frakcji 0/2 mm. Badania przeprowadzono na mieszance typu beton asfaltowy AC16W 50/70 KR3-4. Wykonano 5 rodzajów analizowanej MMA: bez dodatku granulatu gumowego oraz z dodatkiem 1% i 2% (w stosunku do masy mieszanki mineralnej) granulatu gumowego aktywowanego o uziarnieniu do 2 mm i nieaktywowanego o uziarnieniu do 2 mm. Proces aktywacji odbywał się przy zastosowaniu elektromagnetycznego młyna z generatorem mikrofal, wirnika odśrodkowego obracającego się z prędkością naddźwiękową oraz sprzętu pomocniczego. Dla każdej z MMA wyznaczono gęstość, gęstość objętościową i zawartość wolnych przestrzeni oraz badano odporność na działanie wody i mrozu. Na podstawie badań zaobserwowano, że dodatek granulatu gumowego do MMA wpływa niekorzystnie na zawartość wolnych przestrzeni powodując ich przyrost. Dodatek granulatu gumowego wpływa także na odporność MMA na działanie wody i mrozu, z tym że wpływ ten jest uzależniony od ilości dodanego granulatu gumowego.

**Słowa kluczowe:** wskaźnik ITSR, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, gęstość objętościowa, zawartość wolnych przestrzeni, guma aktywowana.

### 1. Wprowadzenie

Przyrost liczby pojazdów samochodowych generuje nie tylko problem związany z coraz większym obciążeniem nawierzchni drogowych. Większa liczba samochodów wpływa niekorzystnie na środowisko naturalne i to nie tylko z uwagi na wydzielane spaliny. Duży problem stanowi utylizacja zużytych opon samochodowych, których ilość w ostatnich latach systematycznie się zwiększa. Brak miejsc przeznaczonych na składowanie odpadów gumowych sprawia, że materiały te porzucane są w różnych, najczęściej nielegalnych, składowiskach. Opony charakteryzują się dużą trwałością (długi okres degradacji, który może nawet przekroczyć 100 lat), w związku z czym są uciążliwym odpadem dla środowiska naturalnego. Aby ograniczyć ich negatywny wpływ na środowisko naturalne zaleca się prowadzenie odpowiednich działań, które pozwolą na ich ponowne wykorzystanie. Do takich działań zaliczamy: spalanie opon, ich utylizację metodą pirolizy, utylizację poprzez rozpuszczanie w rozpuszczalnikach organicznych, bieźnikowanie opon czy ich rozdrabnianie (mechaniczne lub kriogeniczne) na miął gumowy [1,2].

Miał gumowy może być cennym dodatkiem do mieszanek mineralno-asfaltowych. Powszechnie znanymi sposobami modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych dodatkiem miału (granulatu) gumowego są [1]:

- a) metoda „na mokro” („wet”) – polegająca na dodawaniu granulatu gumowego bezpośrednio do asfaltu;
- b) metoda „na sucho” („dry”) – polegająca na dodaniu granulatu gumowego do kruszywa (część kruszywa zastępowana jest gumą).

Przeprowadzono wiele badań dotyczących oceny wpływu dodatku miału gumowego na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych modyfikowanych gumą, zarówno metodą „na sucho”, jak i metodą „na mokro”. Badania potwierdzają korzystny wpływ granulatu gumowego na takie właściwości MMA (mieszanek mineralno-asfaltowych), jak: zwiększenie modułu sztywności [3], zwiększenie trwałości zmęczeniowej [4,10]; zwiększenie odporności na koleinowanie [5,10,11,14]. Dodatek gumy do lepiszcza asfaltowego (metoda na mokro) wpływa na: zwiększenie lepkości [7,12,15], zwiększenie przyczepności do kruszywa [7,8], zmniejszenie penetracji [7,13], zwiększenie temperatury mięknięcia [7,11,12,13,16] czy zmniejszenie wrażliwości temperaturowej [5,7,13,14]. Innymi zaletami takich mieszanek są: redukcja hałasu, poprawa przyczepności kół do nawierzchni, wydłużona trwałość nawierzchni (co wpływa na mniejsze koszty utrzymania) [8].

Celem badań, których wyniki przedstawiono w artykule, było sprawdzenie wpływu dodatku granulatu gumowego na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie wody i mrozu – czynników, które występują powszechnie w polskich warunkach klimatycznych i które wpływają niekorzystnie na trwałość nawierzchni drogowych na obszarze Polski. W artykule porównano wyniki uzyskane na próbkach mieszanki bez gumy (mieszanka referencyjna) oraz mieszanki z dodatkiem granulatu gumowego aktywowanego w ilości 1% oraz 2% (w stosunku do masy mieszanki mineralnej) oraz granulatu gumowego nieaktywowanego w tych samych ilościach. Aktywacja gumy odbywała się przy użyciu linii produkcyjnej składającej się z: elektromagnetycznego młyna z generatorem mikrofal, wirnika odśrodkowego obracającego się z prędkością naddźwiękową oraz innego pomocniczego sprzętu. Zmielona guma pochodząca z opon samochodowych była sukcesywnie obrabiana, początkowo za pomocą aktywacji mechanochemicznej, a następnie poddawano ją syntezie i nanosyntezie. Pozwoliło to na uzyskanie nowego materiału, którego struktura jest bardzo podobna do struktury polimerowej [17].

## 2. Przedmiot badań

Badania przeprowadzono na próbkach mieszanki mineralno-asfaltowej typu beton asfaltowy o największym wymiarze kruszywa 16 mm przeznaczonym do warstwy wiążącej – AC16W 50/70 KR3-4 (beton asfaltowy o największym wymiarze kruszywa do 16 mm przeznaczony do warstwy wiążącej, zawierający asfalt drogowy 50/70, przeznaczony do dróg obciążonych ruchem kategorii KR3-4). Program badań obejmował wykonanie pięciu rodzajów mieszanek: bez dodatku granulatu gumowego (próbka referencyjna), z dodatkiem granulatu gumowego aktywowanego w ilości 1% oraz 2% (w stosunku do masy MM (mieszanki mineralnej)) oraz granulatu gumowego nieaktywowanego w tych samych ilościach. Granulat gumowy charakteryzował się uziarnieniem do 2 mm, z czego zdecydowana większość (93,6% – guma nieaktywowana oraz 92,3% – guma aktywowana) przechodziła przez sito 1 mm. Do wykonania MMA użyto kruszyw bazaltowych, sjenitowych i amfibolitowych, wypełniacza wapiennego oraz asfaltu drogowego 50/70 w ilości 4,8% (w stosunku do masy MMA). Skład mieszanki mineralno-asfaltowej (referencyjnej) przedstawiono w tabeli 1, natomiast jej uziarnienie w tabeli 4 (w kolumnie „0%”). Modyfikacji mieszanki mineralno-asfaltowej granulatem gumowym

dokonano metodą „na sucho”. Granulat gumowy wprowadzano do mieszanki kruszywa zastępując część kruszywa bazaltowego o frakcji 0/2. Skład mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem granulatu gumowego w ilości 1% oraz 2% (w stosunku do masy MM) pokazano kolejno w tabelach: 2 i 3, natomiast uziarnienie badanych MMA przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 1. Skład mieszanki AC16W bez dodatku granulatu gumowego

Lp.	Nazwa składnika mieszanki	Udział w mieszance [%]	
		MM	MMA
1.	mączka wapienna	5,5	5,2
2.	kruszywo drobne bazaltowe 0/2	31,0	29,5
3.	kruszywo grube (grys) sjenitowe 2/5	20,0	19,0
4.	kruszywo grube (grys) sjenitowe 4/8	14,0	13,3
5.	kruszywo grube (grys) bazaltowe 8/11	8,2	7,9
6.	kruszywo grube (grys)amfibolitowe 11/16	21,3	20,2
7.	asfalt drogowy 50/70		4,8

Tabela 2. Skład mieszanki AC16W z dodatkiem granulatu gumowego aktywowanego (A) oraz nieaktywowanego (N/A) w ilości 1% (w stosunku do masy MM)

Lp.	Nazwa składnika mieszanki	Udział w mieszance [%]			
		MM		MMA	
		A	N/A	A	N/A
1.	mączka wapienna	5,5	5,5	5,2	5,2
2.	kruszywo drobne bazaltowe 0/2	30,0	30,0	28,6	28,6
3.	granulat gumowy	1,0	1,0	1,0	1,0
4.	kruszywo grube (grys) sjenitowe 2/5	20,0	20,0	19,0	19,0
5.	kruszywo grube (grys) sjenitowe 4/8	14,0	14,0	13,3	13,3
6.	kruszywo grube (grys) bazaltowe 8/11	8,3	8,3	7,9	7,9
7.	kruszywo grube (grys) amfibolitowe 11/16	21,3	21,3	20,2	20,2
8.	asfalt drogowy 50/70			4,8	4,8

Tabela 3. Skład mieszanki AC16W z dodatkiem granulatu gumowego aktywowanego (A) oraz nieaktywowanego (N/A) w ilości 2% (w stosunku do masy MM)

Lp.	Nazwa składnika mieszanki	Udział w mieszance [%]			
		MM		MMA	
		A	N/A	A	N/A
1.	mączka wapienna	5,5	5,5	5,2	5,2
2.	kruszywo drobne bazaltowe 0/2	29,0	29,0	27,6	27,6
3.	granulat gumowy	2,0	2,0	1,9	1,9
4.	kruszywo grube (grys) sjenitowe 2/5	20,0	20,0	19,0	19,0
5.	kruszywo grube (grys) sjenitowe 4/8	14,0	14,0	13,3	13,3
6.	kruszywo grube (grys) bazaltowe 8/11	8,3	8,3	7,9	7,9
7.	kruszywo grube (grys) amfibolitowe 11/16	21,3	21,3	20,2	20,2
8.	asfalt drogowy 50/70			4,8	4,8

Badania wykonano zgodnie z procedurą opisaną w Wymaganiach Technicznych WT-2 [18]. Wszystkie próbki zostały przygotowane zgodnie z Załącznikiem nr 1 do WT-2 [18], a następnie zagęszczone w porównywalnych warunkach za pomocą ubijaka Marshalla zgodnie z normą [23]. Próbki przeznaczone do badania odporności na działanie wody i mrozu zagęszczono poprzez wykonanie po 35 uderzeń na każdą stronę, natomiast próbki przeznaczone do oznaczenia gęstości objętościowej – po 75 uderzeń na każdą stronę. Odporność MMA na działanie wody i mrozu określono na podstawie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie oznaczonej na próbkach „mokrych” (po kondycjonowaniu) w stosunku do oznaczonej na próbkach „suchych” (bez kondycjonowania) – tzw. wskaźnik ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) – wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie obliczony ze wzoru [18]:

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

gdzie:

ITSR – wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie [%],

$ITS_w$  – średnia wytrzymałość na rozciąganie pośrednie wyznaczona dla próbek mokrych [kPa],

$ITS_d$  – średnia wytrzymałość na rozciąganie pośrednie wyznaczona dla próbek suchych [kPa].

Oprócz odporności MMA na działanie wody i mrozu, na próbkach każdej analizowanej mieszanki (referencyjnej, z dodatkiem 1% oraz 2% granulatu gumowego aktywowanego oraz nieaktywowanego) określono gęstość, zgodnie z normami [19,20], oraz zawartość wolnych przestrzeni, zgodnie z normą [21].

Tabela 4. Uziarnienie badanych mieszanek mineralnych

Wymiar sita [mm]	Przesiew [%] przy zawartości granulatu gumowego (w stosunku do masy MM)					Krzywe graniczne	
	0%	1% (A)	1% (N/A)	2% (A)	2% (N/A)	Dolna	Górna
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7	90,0	100,0
11,2	79,5	79,5	79,5	79,5	79,5	70,0	90,0
8,0	70,5	70,5	70,5	70,5	70,5	55,0	85,0
5,6	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	–	–
4,0	50,7	50,7	50,7	50,7	50,7	–	–
2,0	35,1	35,1	35,1	35,2	35,2	25,0	50,0
1,0	23,2	23,6	23,6	23,9	24,0	–	–
0,50	16,4	16,7	16,7	17,0	17,1	–	–
0,25	12,3	12,4	12,4	12,5	12,5	–	–
0,125	10,7	10,6	10,7	10,5	10,6	4,0	12,0
0,063	6,7	6,6	6,6	6,6	6,6	4,0	10,0

Legenda:

A – granulaty gumowy aktywowany

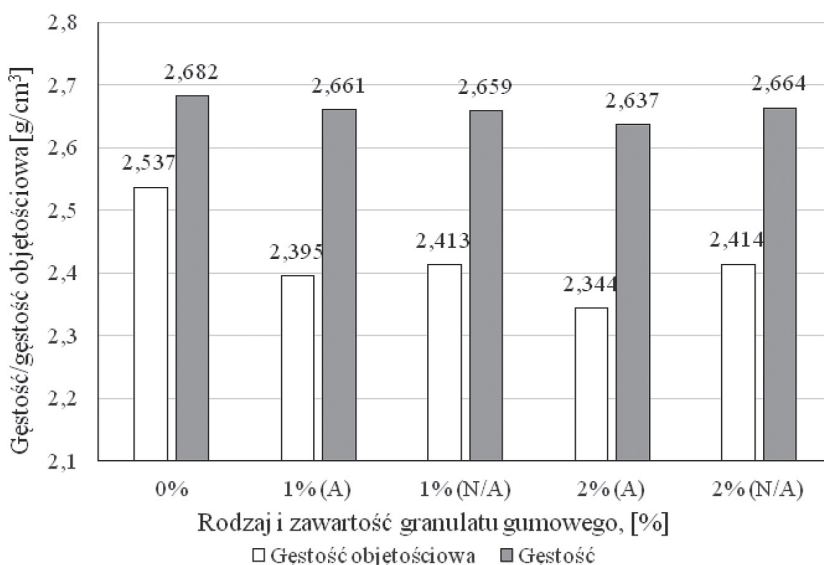
N/A – granulaty gumowy nieaktywowany

### 3. Analiza wyników badań

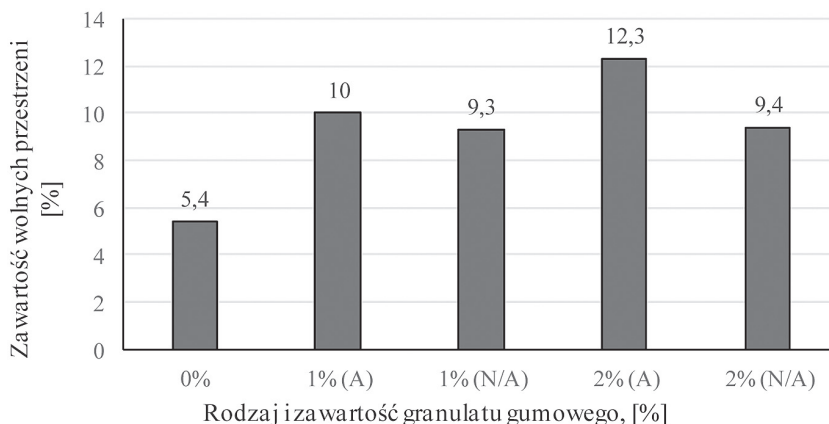
#### 3.2. Gęstość MMA oraz zawartość wolnych przestrzeni

Wyniki oznaczenia gęstości oraz gęstości objętościowej przedstawiono na rysunku 1, natomiast wyniki oznaczenia zawartości wolnych przestrzeni na rysunku 2.

Dodatek granulatu gumowego do mieszanki mineralno-asfaltowej spowodował, że zawartość wolnych przestrzeni w mieszance znacznie zwiększyła się w porównaniu do mieszanki bez dodatku granulatu gumowego. Przyrost ten jest na tyle duży, że mieszanka mineralno-asfaltowa, zarówno z dodatkiem 1%, jak i 2% granulatu gumowego aktywowanego i nieaktywowanego, nie spełniła wymagań odnośnie zawartości wolnych przestrzeni, która zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2 [18] dla tego typu MMA wynosi od 4 do 7%.



Rys. 1. Wyniki oznaczenia gęstości oraz gęstości objętościowej badanych MMA



Rys. 2. Zawartość wolnych przestrzeni w badanych MMA

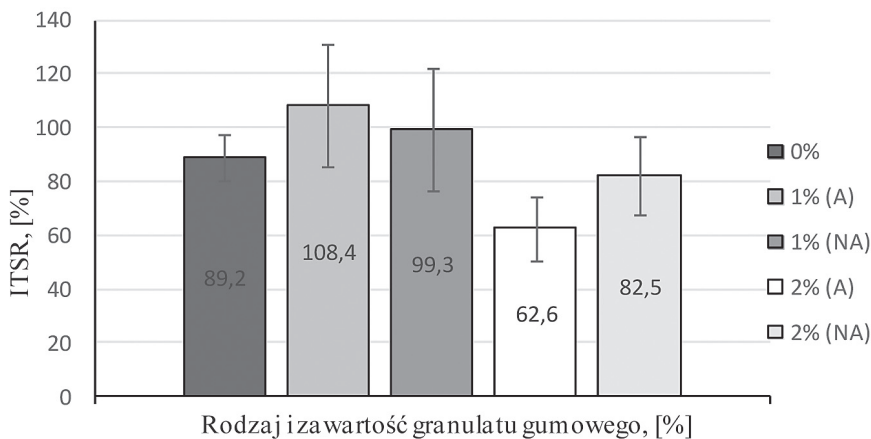
### 3.2. Odporność MMA na działanie wody i mrozu

Wyniki badania odporności analizowanych MMA na działanie wody i mrozu przedstawiono na rysunku 3. Wyniki przedstawiono w postaci średniej arytmetycznej oraz przedziałów niepewności określonych przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ .

Na podstawie tych wyników można zauważyć, że dodatek granulatu gumowego ma wpływ na odporność MMA na działanie wody i mrozu. Wpływ ten jest uzależniony od rodzaju i zawartości granulatu gumowego w MMA.

W przypadku mieszanki referencyjnej (bez dodatku granulatu gumowego) wartość wskaźnika ITSR wyniosła 89,2%, co jest zgodne z wymaganiami WT-2 [18]. Dodatek 1% granulatu gumowego spowodował, że wartość wskaźnika ITSR zwiększyła się do 108,4% (w przypadku granulatu gumowego aktywowanego) oraz do 99,3% (w przypadku granulatu gumowego nieaktywowanego), co świadczy o większej odporności MMA na działanie wody i mrozu. Dodatek 2% granulatu gumowego sprawił, że wartość wskaźnika ITSR uległa zmniejszeniu w porównaniu z pozostałymi MMA (referencyjną oraz z zawartością 1% granulatu gumowego aktywowanego i nieaktywowanego) do wartości 82,5% (granulat nieaktywowany) oraz 62,6% (granulat aktywowany). Na tej podstawie można stwierdzić, że zbyt duża zawartość granulatu gumowego powoduje zmniejszenie odporności MMA na działanie wody i mrozu.

Podczas wykonywania badań zaobserwowano, że próbki mieszanki referencyjnej uległy pęknięciu wzdłuż ich średnicy, w wyniku czego po wyjęciu z maszyny wytrzymałościowej rozpadły się na dwie połowy (zniszczenie typu „A” zgodnie z normą [22]). Próbki MMA z dodatkiem granulatu gumowego zachowały się w odmienny sposób. Próbki po zniszczeniu nie rozpadły się. W ich przypadku zaobserwowano zniszczenie typu „C” – kombinacja (ograniczona linia pęknięcia przy rozciąganiu, przy szczękach obszary zdeformowane). Może to wynikać z faktu, iż granulaty gumowy powoduje redukcję sztywności MMA, co potwierdziły wyniki oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie pośrednie.



Rys. 3. Zestawienie wartości wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSR badanych MMA

### 4. Wnioski

Na podstawie analizy rezultatów wykonanych badań laboratoryjnych można sformułować następujące wnioski:



- a) Dodatek granulatu gumowego do MMA ma wpływ na zwiększenie zawartości wolnych przestrzeni w MMA powodując, że MMA nie spełnia wymagań dotyczących tego kryterium. Dodatkowo granulaty gumowy aktywowany sprawia, że zawartość wolnych przestrzeni jest większa niż w przypadku granulatu gumowego nieaktywowanego (porównując MMA o tej samej zawartości granulatu gumowego).
- b) Dodatek granulatu gumowego do MMA wpływa na odporność MMA na działanie wody i mrozu, ale wpływ ten uzależniony jest od zawartości analizowanego granulatu w MMA. W przypadku zawartości 1% granulatu gumowego otrzymano poprawę odporności MMA na działanie wody i mrozu, natomiast dodatek 2% granulatu sprawił, że odporność ta uległa znacznemu pogorszeniu.
- c) Proces aktywacji granulatu gumowego ma wpływ na wartość wskaźnika ITSR. Przy zawartości 1% granulatu gumowego wartość wskaźnika ITSR jest większa niż w przypadku zastosowania granulatu gumowego nieaktywowanego. Zależność ta jednak ulega zmianie przy zwiększeniu zawartości zastosowanych w badaniach granulatów – wówczas wartość wskaźnika ITSR MMA z dodatkiem granulatu gumowego aktywowanego ulega znacznemu zmniejszeniu w porównaniu z dodatkiem granulatu nieaktywowanego.
- d) Granulat gumowy ma istotny wpływ na zachowanie się MMA podczas badania odporności na działanie wody i mrozu. Mieszanki bez dodatku granulatu gumowego rozpadały się, natomiast po jego dodaniu efekt zniszczenia próbki był inny, bowiem próbki nie ulegały rozpadowi. Na tej podstawie można wnioskować, że granulaty gumowy poprawia spójność MMA.

Przedstawiona w niniejszym artykule analiza dotyczy konkretnej mieszanki mineralno-asfaltowej (AC16W 50/70 KR3-4) oraz konkretnego sposobu aplikacji, w związku z czym możliwe jest uzyskanie innych wyników badań wobec innych mieszanek mineralno-asfaltowych.

## Literatura

- [1] Piłat J., Radziszewski P. *Nawierzchnie asfaltowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
- [2] Gronowicz J., Kubiak T. *Recykling zużytych opon samochodowych*. Problemy Eksploatacji 2 (2007), 5–18.
- [3] Jurczak R.: *Zainteresowanie gumą rośnie?*, Drogownictwo 6 (2012) 204–206.
- [4] Plewa A. *Zastosowanie mialu gumowego ze zużytych opon samochodowych w mieszankach mineralno-asfaltowych*. Inżynieria Ekologiczna 40 (2014) 217–227.
- [5] Sybilski D., Bańkowski W., Horodecka R., Wróbel A., Mirski K. *Metoda modyfikacji mieszanki mineralno-asfaltowej gumą z zastosowaniem dodatku „tecRoad”*. Drogownictwo 6 (2011) 189–193.
- [6] Radziszewski P., Sarnowski M., Król J., Kowalski K., Ruttmar I., Zborowski A. *Właściwości asfaltów modyfikowanych gumą i mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych*. WKŁ, Warszawa 2017.
- [7] Koba H., Skotnicki L., Szydło A. *Właściwości asfaltu modyfikowanego gumą – praktyczne zastosowanie*. Drogownictwo 11 (2010) 378–382.
- [8] Koba H., Szydło A. *Wpływ asfaltów modyfikowanych gumą na przyczepność do skał* Drogownictwo 6 (2010) 198–201.
- [9] Gawel I., Piłat J., Radziszewski P., Król J. *Rubber modified bitumen*. Polimer Modified Bitumen, Woodhead Publishing, Oxford (2011).
- [10] Kisgyörgy L., Toth C., Geiger A. *Elastic modulus of asphalt with chemically stabilized rubber bitumen*. Gratevinar 68 (7) (2016) 533–541.

- [11] Chen J.S., Liao M.C., Tsai H.H. *Evaluation and optimization of the engineering properties of polymer-modified asphalt*. Journal of Failure Analysis and Prevention 2(3) (2002) 75–83.
- [12] Ibrahim M.R., Katman H.Y., Karim M.R., Kotling S., Mashaan N.S. *A review on the effect of crumb rubber addition to the rheology of crumb rubber modified bitumen*. Advances in Material Science and Engineering 3 (2013).
- [13] Ramez Al.-Mansob, Amiruddin Bin Ismail, Nur Izzi Md. Yusoff, Mojtaba Shojaei Baghini. *Rheological characteristics of epoxidized natural rubber modified bitumen*
- [14] Navarro F.J., Partal P., Martinez-Boza F., Valencia C., Gallegos C. *Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens*. Fuel 83 (2004) 2041–2049.
- [15] Navarro F.J., Partal P., Martinez-Boza F., Valencia C., Gallegos C. *Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens*. Chemical Engineering Journal 89 (2002) 53–61.
- [16] Zhu X.-q., Lu C.-h., Liang M. *Rheological property of bitumen modified by the mixture of the mechanochemically devulcanized tire rubber powder and SBS*, Journal of Materials in Civil Engineering 11 (2009) 699–705.
- [17] Najzarek Z., Wełnowski J. *Novel mechanochemical technology for valorization of waste tire rubber*. Konferencja InterNanoPoland, Katowice 2016.
- [18] Wymagania Techniczne WT-2, część 1: *Mieszanki mineralno-asfaltowe*. Wymagania Techniczne, GDDKiA, Warszawa 2014.
- [19] PN-EN 12697-5. *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Oznaczenie gęstości*.
- [20] PN-EN 12697-6. *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Oznaczenie gęstości objętościowej próbek mieszanek mineralno-asfaltowych*.
- [21] PN-EN 12697-8. *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Oznaczenie zawartości wolnej przestrzeni*.
- [22] PN-EN 12697-23. *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Oznaczenie wytrzymałości mieszanek mineralno-asfaltowych na rozciąganie pośrednie*.
- [23] PN-EN 12697-32. *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Przygotowanie próbek zagęszczonych przez ubijanie*.

## **Investigation of impact of a crumb rubber granulate addition on the asphalt mixtures resistance to water and frost**

**Damian Wiśniewski<sup>1</sup>, Milena Selke<sup>2</sup>, Anna Smolińska<sup>2</sup>, Mieczysław Słowik<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *University of Science and Technology in Bydgoszcz, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: damian.wisniewski@utp.edu.pl*

<sup>2</sup> *Student of Civil Engineering, University of Technology and Nature in Bydgoszcz, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering*

<sup>3</sup> *Poznan University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Institute of Civil Engineering, Piotrowo 5, 61-138 Poznań, e-mail: mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl*

**Abstract:** The article presents the results of the tests of hot mix asphalt (HMA) modified with the addition of crumb rubber granulate using the dry method. This modification consisted in the applying of rubber granules into the aggregate mixture, replacing a 0/2 mm

fraction of the basalt aggregate. The tests were carried out for the Asphalt Concrete to be used in binder course of a road pavement (AC16W 50/70). There were 5 types of HMA analyzed: without the addition of rubber granules as well as with 1% or 2% (in relation to the weight of the aggregate mix) of activated with a grain size up to 2 mm and non-activated rubber granules with the same grain size. The activation process was carried out using an electromagnetic mill with a microwave generator, centrifugal rotor mill with supersonic speed and auxiliary equipment. For each analyzed mixture type, density, bulk density, air voids and resistance to water and frost were determined. On the basis of the research, it was observed that the addition of crumb rubber granules to HMA adversely affects the air voids content causing its increase. The addition of crumb rubber granulate also affects the resistance of HMA to water and frost, but the quantitative changes depend on the amount of added crumb rubber granulate.

**Keywords:** ITSR, indirect tensile strength, bulk density, air voids content, activated rubber.



## **Analiza rozkładu hałasu w przestrzeni osiedla im. A. Mickiewicza w Lublinie<sup>1</sup>**

**Aleksandra Joachimowicz<sup>1</sup>, Kamil Nieścioruk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Lublin, e-mail: olajoa@wp.pl

<sup>2</sup> Katedra Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. S. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin, e-mail: kamil.niescioruk@up.lublin.pl

**Streszczenie:** Artykuł porusza zagadnienie pomiarów i analizy hałasu w przestrzeni osiedla w relacji do jego otoczenia oraz kompozycji architektoniczno-krajobrazowej. Pomiar hałasu w niemal 70 punktach osiedla, w trzech różnych porach dnia pozwolił stworzyć (z wykorzystaniem narzędzi GIS) obraz przestrzennej zmienności zjawiska. Wynikowe mapy poddano analizie, wskazano źródła hałasu i czynniki redukujące rozprzestrzenianie się dźwięku, jak również wskazano możliwości dalszych badań.

**Słowa kluczowe:** hałas, mapa akustyczna, Lublin, GIS, zabudowa wielorodzinna, źródła hałasu.

### **1. Hałas i przeciwdziałanie mu w środowisku miejskim**

Postęp cywilizacyjny i rozwój urbanistyczny w przestrzeni miejskiej spowodowały pojawienie się i narastanie licznych zagrożeń w środowisku życia jej mieszkańców. Jednym z tych zagrożeń jest hałas, który ma bezpośredni wpływ na komfort i zdrowie człowieka. Uporczywy, narastający poziom dźwięku powoduje wiele negatywnych skutków.

Hałas definiowany jest różnorodnie, choć większość jego definicji jest zbliżonych. Jest on określany jako „wszystkie niepożądane, nieprzyjemne, dokuczliwe lub szkodliwe drgania mechaniczne ośrodka sprężystego, działającego za pośrednictwem powietrza na organ słuchu i inne zmysły oraz elementy” [2, s. 7], na poziomie prawnym natomiast hałas w środowisku rozumiany jest jako „niepożądane lub szkodliwe dźwięki powodowane przez działalność człowieka na wolnym powietrzu” [3, s. 102].

Hałas w wielofunkcyjnym środowisku miejskim traktowany jest jako element nieodczyny, ale zdecydowanie uciążliwy [4]. Długie przebywanie w środowisku, w którym człowiek jest narażony na negatywne bodźce dźwiękowe (również te o niskim natężeniu), powoduje liczne zaburzenia fizyczne (m.in. stres oksydacyjny, nadciśnienie, uszkodzenie słuchu, choroby niedokrwienne serca) i psychiczne (m.in. zaburzenia snu, zaburzenia rozwoju poznawczego u dzieci) [5, 6, 7].

Hałas powoduje również negatywne skutki w przestrzeni miejskiej, w tym w sferze ekonomii. Potencjalni kupcy nieruchomości szukają spokoju i komfortu oraz miejsca nienarażonego na hałas komunikacyjny i ponadnormowy poziom dźwięku [8, 9].

Istnieje wiele sposobów redukcji oddziaływania miejskiego hałasu na strefy zamieszkania i, co istotne, nie są to tylko środki stosowane w bezpośrednim sąsiedztwie emiterów (np. dróg). Można tu mówić o unikaniu emisji, a więc odpowiednim planowaniu przestrzennym

<sup>1</sup> Praca powstała w oparciu o badania i analizy wykonane przez autorkę w ramach pracy magisterskiej [1].

i strefowaniu zabudowy, zmniejszeniu hałasu w strefie emisji (w przypadku dróg może to być zwolnienie i ukierunkowanie ruchu), czy wreszcie ograniczeniu hałasu w strefie imisji. W tym ostatnim przypadku wymienić można odpowiednie lokalizowanie budynków względem siebie i względem źródeł hałasu oraz metody i środki techniczne ochrony terenów narażonych [7, 10]. Oprócz odpowiedniego projektowania architektury znaczenie ma też projektowanie zieleni, której jedną z funkcji użytkowych jest izolacja od bodźców wizualnych, zapachowych i właśnie dźwiękowych [11]. Niekiedy wskazuje się jednak, że aby była to metoda skuteczna w ochronie przed hałasem, zieleń musi posiadać odpowiednie parametry (być nieco wyższa niż linia łącząca emiter z odbiorcą) [12]. Istotna jest także relacja terenów zieleni do zabudowy i innych elementów morfologii przestrzeni miejskiej [13].

## 2. Wskaźniki oceny oraz normy hałasu

Hałas wpływa na kształtowanie klimatu akustycznego środowiska, a jego ocena polega na wykonaniu odpowiednich pomiarów oraz ich wnikliwej analizie. W 2002 roku wdrożono unijną Dyrektywę 2002/49/WE dotyczącą oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku [3]. Określa ona wskaźniki hałasu, które związane są z równoważnym poziomem dźwięku (A). Wskaźnik  $L_{den}$  określa poziom hałasu w decybelach z uwzględnieniem trzech pór – dziennej (godz. 6.00–18.00), wieczornej (18.00–22.00) i nocnej (22.00–6.00). Dla każdej z pór określana jest długookresowa, ważona dźwiękiem A średnia poziomu dźwięku ustalona dla wszystkich danych pór w roku. W Polsce implementacja Dyrektywy funkcjonuje w formie krajowych aktów prawnych. Wyżej opisany wskaźnik (określony jako  $L_{DWN}$ ) wprowadza Rozporządzenie Ministra Środowiska [14] z dnia 10 listopada 2010 r. w sprawie sposobu ustalania wartości wskaźnika hałasu  $L_{DWN}$ .

Krajowe akty prawne określają także dopuszczalne normy hałasu dla różnych wskaźników, pór oraz terenów. Mając na uwadze przedmiot niniejszej publikacji, warto przytoczyć, iż dla terenów związanych ze stałym lub czasowym pobytom dzieci i młodzieży wskaźnik  $L_{DWN}$  kształtuje się następująco (w dB):

- hałas, którego źródłem są drogi lub linie kolejowe: 64 (nocą 59),
- hałas z innych źródeł: 50 (nocą 40).

Dla terenów zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej oraz mieszkaniowo-usługowej wartości graniczne to dla hałasu, którego źródłem są drogi lub linie kolejowe: 68 (nocą 59), a dla hałasu z innych źródeł: 55 (nocą 45) [15].

## 3. Mapa akustyczna i modelowanie

W związku z problemem narastającego hałasu w środowisku przyrodniczym i życiu człowieka powstała potrzeba opracowania metody służącej do kontroli zarówno klimatu akustycznego, jak i zachodzących w nim zjawisk. Wspomniana Dyrektywa zobowiązuje państwa członkowskie Unii Europejskiej do tworzenia map akustycznych. Mapę taką przepisy definiują jako „mapę opracowaną do celów całościowej oceny narażenia na hałas z różnych źródeł na danym obszarze, albo do celów sporządzania ogólnych prognoz dla danego obszaru” [3, s. 103].

W praktyce mapy akustyczne wykonuje się w oparciu o pomiary w wytypowanych punktach dla hałasu z ruchu kołowego, kolejowego i przemysłowego. Efektem takiego podejścia jest to, że natężenie hałasu nie jest badane bezpośrednio i równomiernie na wszystkich obszarach oddalonych od wytypowanych źródeł dźwięku. Mapy emisji pokazują wartości



hałasu mierzone w źródle, natomiast mapy imisji – natężenie hałasu docierające do odbiorcy. W zależności od wybranej metody wyniki np. we wnętrzach osiedli, terenów zieleni itp. są modelowane, a nie mierzone. Modelowanie odbywa się z wykorzystaniem różnorodnych algorytmów, które implementowane są w środowisku komputerowym, przeważnie w oprogramowaniu z grupy GIS (Systemów Informacji Geograficznej), jako tym predysponowanym do analiz danych przestrzennych. Analizy z zastosowaniem tego typu narzędzi wykonuje się od końca ubiegłego wieku, modelując całe miasta, wybrane tereny specjalne czy porównując obiekty między sobą [16, 17, 18, 19]. Współcześnie modeluje się hałas nie tylko w ujęciu ilościowym, ale także podejmuje próby waloryzacji jakościowej wyników pomiarów [20].

Pomiar i modelowanie hałasu według zaleceń Dyrektywy powinno być realizowane z wykorzystaniem modelu NMPB-Routes-96 (francuska metoda obliczeniowa) lub modelu krajowego, jeśli taki został zdefiniowany. Model francuski realizowany jest na wstępnych etapach według następującej procedury:

- podział źródła liniowego dźwięku (np. drogi) na źródła punktowe,
- realizacja pomiaru punktowego poziomu mocy akustycznej dla każdego ze źródeł,
- określenie tras propagacji dźwięku (bezpośrednie i odbite).

Model powinien uwzględniać także m.in. wpływ fasady budynku, na poziom dźwięku, absorpcję atmosferyczną, tłumienie gruntu czy warunki atmosferyczne. Podstawową wielkością charakteryzującą hałas jest w przypadku tej metody poziom dźwięku A [21].

## 4 Obszar, cel i metoda badań

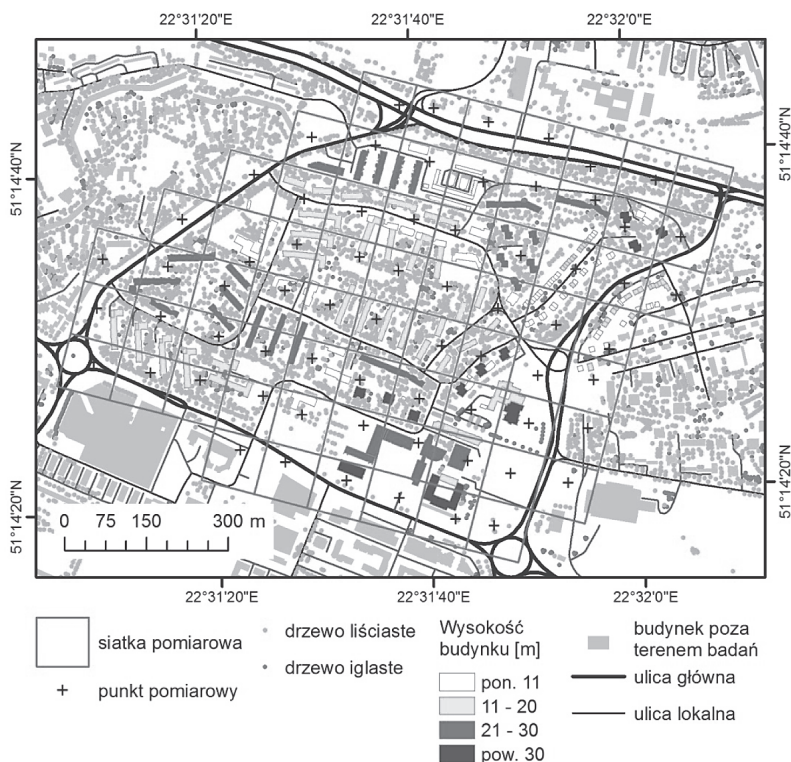
Przedmiotem niniejszej pracy jest analiza rozkładu hałasu w przestrzeni wybranego osiedla w relacji do struktury jego zabudowy i roślinności. Jako obszar badań wybrano osiedle im. Adama Mickiewicza w Lublinie.

Osiedle to było pierwszym osiedlem Lubelskiej Spółdzielni Mieszkaniowej (LSM), budowano je od 1958 do 1971 roku (większość zakończono do połowy lat 60.). Uważane jest za wzorowy przykład wkomponowania zieleni w przestrzeń osiedla oraz współgrania tych elementów z rzeźbą terenu, co zapewniło ówczesnie osiedlu wyjątkowe walory kompozycyjno-przestrzenne (warto zwrócić uwagę m.in. na centralnie położony ogród – miejsce wypoczynku i rekreacji). Za konsultowany z mieszkańcami projekt osiedla odpowiadał inż. Feliks Haczewski, a za tereny zieleni – inż. Józef Maciejewski [22, 23]. Obecność zieleni była i jest cechą wyróżniającą osiedli LSM – na omawianym osiedlu aż 20 z 42 ha powierzchni przeznaczono pod tereny zieleni osiedlowej [24]. Po transformacjach ustrojowych lat 90. XX wieku osiedle borykało się z problemami wynikającymi z nowych realiów. Zieleń została zaniedbana, nastąpił silny rozrost części niektórych form roślinnych, prowadząc m.in. do nadmiernego zacienienia mieszkań i terenów [22]. Układ komunikacyjny osiedla, zaprojektowany tak, aby odseparować od siebie ruch pieszy i kołowy, okazał się niewydolny wobec wzrostu liczby samochodów. Niewielkie, osiedlowe uliczki zapewniające w zamyśle dostawy i dojazd, stały się wobec braku miejsc postojowych, parkingami. Oryginalny projekt osiedla nie przewidywał też rozwoju infrastruktury związanej z ruchem rowerowym [25]. Osiedle nadal jest jednak atrakcyjnym miejscem do życia – zapewnia infrastrukturę edukacyjną, kulturalną i zdrowotną, w pobliżu znajdują się tereny handlowe, dobre jest skomunikowanie osiedla z centrum miasta. Podejmowane są także próby kompleksowej rewitalizacji przestrzeni lub jej fragmentów (np. centralnego placu osiedla) z udziałem mieszkańców [26]. W pracy postanowiono zanalizować przestrzeń osiedla pod kątem jego klimatu dźwiękowego. W przeciwieństwie do oficjalnych map akustycznych, w przypadku których analizowany jest hałas drogowy, kolejowy

i przemysłowy, w pracy zbadano natężenie dźwięków bez wyróżniania ich źródła. Imisja hałasu dla potrzeb tworzenia map akustycznych określana jest na podstawie modelu obliczeniowego, dla którego źródłem danych są wartości emisyjne (pomiarы wzdłuż dróg). Zalecany przez Unię Europejską wspomniany model NMPB-Routes-96 uwzględnia moc akustyczną źródła i propagację dźwięku [27]. W związku z tym dla obszarów oddalonych od dróg wyniki analiz – zgodnie z przepisami – nie uwzględniają innych potencjalnych źródeł hałasu. W niniejszej pracy scharakteryzowano klimat akustyczny osiedla dokonując pomiarów w regularnie rozmieszczonych punktach w przestrzeni całego osiedla, co w efekcie pozwoliło zobrazować rozkład hałasu w sposób znacznie bardziej rzeczywisty, a jednocześnie poddać pod dyskusję przyczyny takiego rozkładu przestrzennego zjawiska i wpływ struktury urbanistyczno-krajobrazowej osiedla na charakter tego zjawiska.

## 5. Prace przygotowawcze i pozyskanie danych

Pomiar wartości natężenia hałasu poprzedzono analizą terenu badań. Celem prac przygotowawczych było równomierne rozmieszczenie stanowisk pomiarowych. Na mapę osiedla naniesiono regularną siatkę kwadratów (o bokach 100 m każdy). Pozwoliło to podzielić analizowany teren na mniejsze obszary, co zwiększyło dokładność wyników badań. Kwadraty znajdujące się na granicy osiedla i wykraczające poza jego teren pozostawiono bez przycinania, co pozwoliło w pomiarach lepiej uwzględnić wpływ okalających osiedle ulic oraz zachować pełną ciągłość otrzymanych wyników badań.



Rys. 1. Obszar badań

W efekcie otrzymano 69 sektorów. W centralnej części każdego umieszczono stanowisko pomiarowe (Rys. 1), przy czym rzeczywisty pomiar nie zawsze był możliwy w wyznaczonym miejscu ze względu na np. znajdującą się tam zabudowę mieszkaniową. W takich sytuacjach wykonano pomiary jak najbliżej stanowisk pomiarowych.

Wyznaczono trzy pory pomiarów sonometrycznych: porę poranną (od godziny 6:00 do 8:00), popołudnie (od godziny 17:00 do 18:00) oraz porę wieczorną (od godziny 21:00 do 22:00). Pozwoliło to przedstawić pełny klimat akustyczny analizowanego obszaru podczas doby. Zakres czasowy każdej pory wynikał z faktu braku możliwości jednoczesnego pomiaru we wszystkich punktach. Do wyznaczenia położenia stanowisk podczas pomiarów terenowych wykorzystano odbiornik GPS Trimble Juno 3B z oprogramowaniem ArcPad, w którym wyświetlano przygotowaną mapę podkładową z siatką pomiarową i punktami. Do pomiaru natężenia hałasu użyto sonometru Center 390 z wiatrochronem. Urządzenie mierzy dźwięk o częstotliwości od 20 Hz do 8 kHz, a dokładność otrzymanych wyników przy 94 dB wynosi +/- 1,4 dB. Pamięć sonometru pozwala na zapisanie wykonanych pomiarów w czasie rzeczywistym.

Pomiar natężenia hałasu wykonano w dwóch rodzajach dnia – powszednim i weekendowym oraz we wcześniej wspomnianych trzech porach doby. W każdym wyznaczonym punkcie pomiarowym wykonano 6-krotny pomiar dźwięku używając trybu SLOW. Interwał czasowy ustawiono na 10 sekund. Przy pomocy odbiornika GPS w każdym ze stanowisk zapisano dokładne współrzędne geograficzne pomiaru, co usprawniło tworzenie map akustycznych.

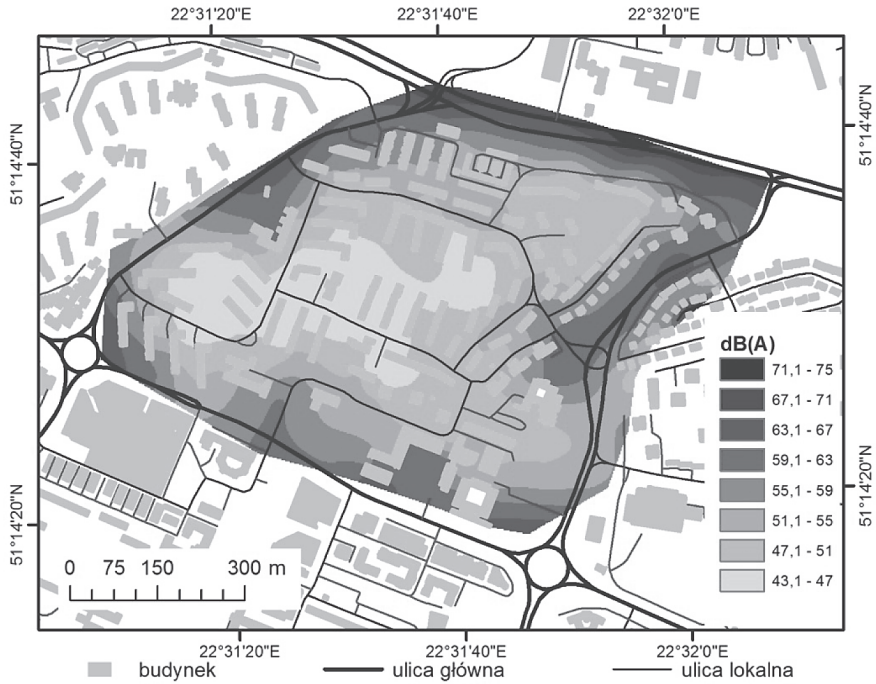
Pomiar wykonano w maju 2018, a zatem można go uznać za reprezentatywny – nie był to okres wakacyjny o mniejszym natężeniu ruchu i mniejszej obecności mieszkańców. Warunki pogodowe pomiaru były odpowiednie – nie odnotowano opadów deszczu ani nadmiernego wiatru, temperatura wynosiła średnio ok. 20°C. Pomiar wykonano na wysokości 1,2 metra nad ziemią.

Mapy i wizualizacje opracowano w oprogramowaniu z pakietu ArcGIS – ArcMap oraz w programie QGIS. Dodatkowo użyto także programu do grafiki wektorowej (Corel-Draw). Oprócz danych uzyskanych w trakcie prac terenowych, wykorzystano warstwy Bazy Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k) dla obszaru Lublina (budynki oraz drogi), a także pozyskaną z Urzędu Miasta warstwę z lokalizacją drzew w mieście.

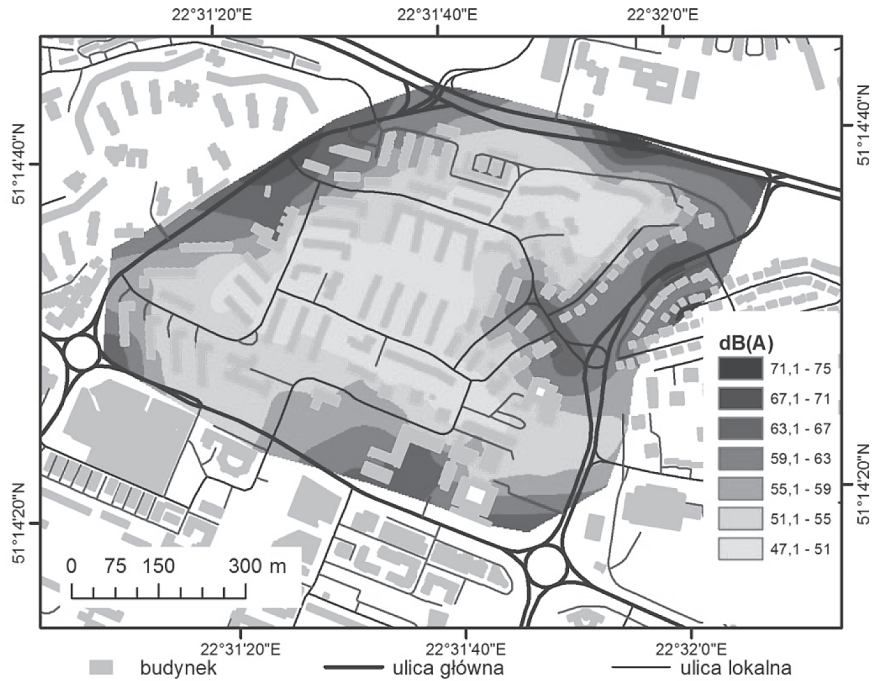
## 6. Wyniki

Zebrane w terenie dane dla 69 punktów wykorzystano do opracowania rastrowego modelu ciągłego zjawiska z użyciem metody interpolacji krzywymi sklejanymi (spline). Do analiz włączono wektorową warstwę budynków, które zostały potraktowane jako bariery dla dźwięku (bez uwzględniania różnic w ich wysokościach).

Wyniki badań i analiza graficzna ukazują dynamiczną zmienność klimatu akustycznego, zależną od rodzaju dnia oraz pory doby w których przeprowadzono pomiary sonometryczne.

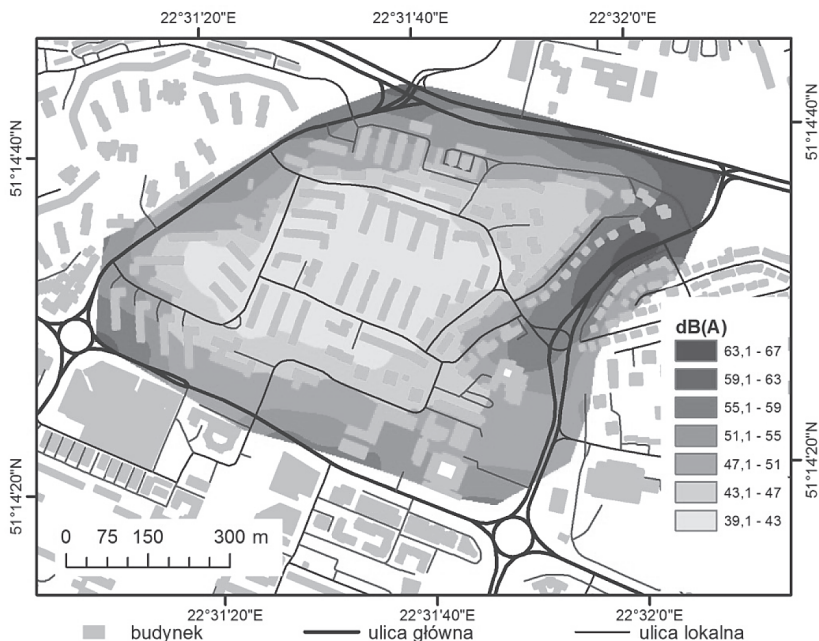


Rys. 2. Rozkład hałasu w porze porannej dnia roboczego



Rys. 3. Rozkład hałasu w porze popołudniowej dnia roboczego

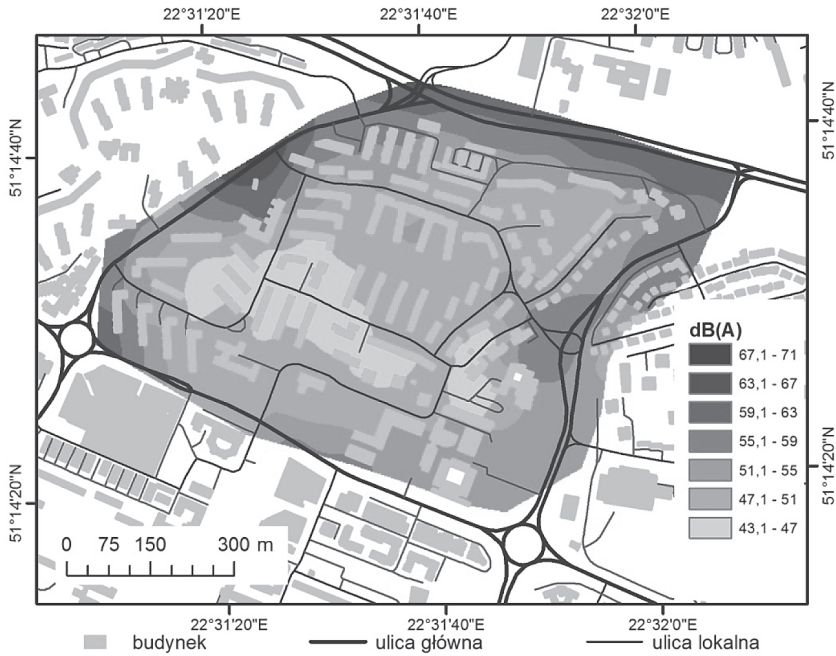




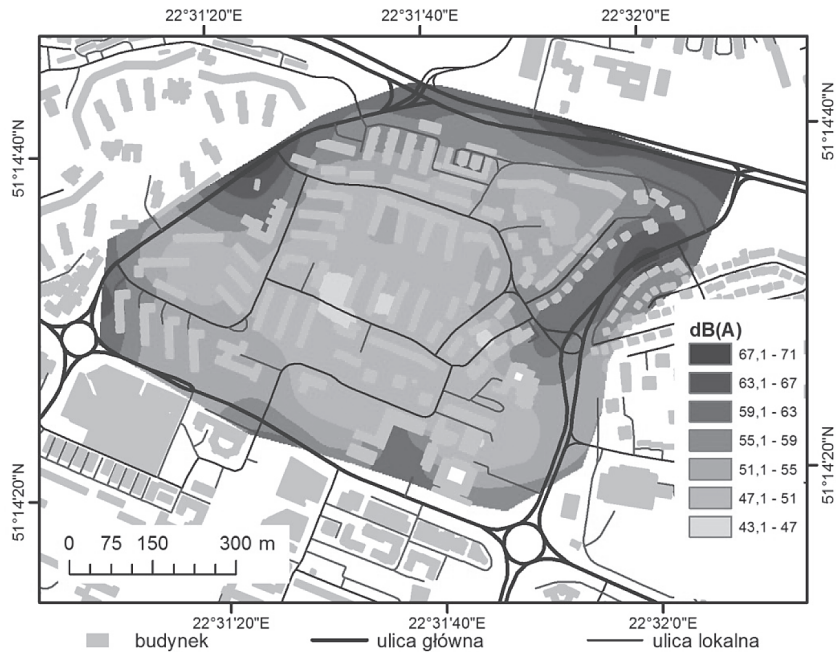
Rys. 4. Rozkład hałasu w porze wieczornej dnia roboczego

Otrzymane wyniki ukazują, że głównym źródłem hałasu są – zgodnie z przewidywaniami – drogi. W miarę oddalania się od źródła hałasu, poziom emitowanego dźwięku maleje. Zjawisko to można zaobserwować w każdej analizowanej porze, niezależnie od typu dnia. W porannych godzinach dnia powszedniego największe wartości (ponad 65 do niemal 74 dB(A)) odnotowano dla okolic ul. Głębokiej oraz przy ul. Wileńskiej i ul. Filaretów w ich częściach północnych, czyli prowadzących do centrum, co oddaje dominujący charakter ruchu samochodowego o tej porze (Rys. 2). Po południu następuje przesunięcie rozkładu hałasu wzdłuż tych ulic w kierunku południowym, co łączyć można ze szczytem komunikacyjnym i powrotami do domów. Ciekawie wygląda zwłaszcza rejon ul. Rymwida (ok 63 dB(A)), stanowiący swoistą bramę do wewnętrznego systemu ulic osiedlowych. Układ zabudowy w tym miejscu powoduje, że ulica jest także strefą przenikania hałasu z sąsiedniej, dwujezdniowej ul. Filaretów (Rys. 3). W porze wieczornej największy hałas (60–65 dB(A)) generuje północny odcinek ul. Filaretów, czyli drogi łączącej południowe dzielnice z centrum miasta (Rys. 4). Jednocześnie widoczne jest znaczne wyciszenie, w porównaniu zwłaszcza z porą popołudniową, praktycznie całego wnętrza osiedla, choć różnice nie są bardzo duże (10 dB(A) – z ok. 50 do ok. 40 dB(A)). Należy pamiętać, że owo centrum, z racji pełnionych funkcji (strefa nie tylko wypoczynku, ale i rekreacji – m.in. plac zabaw) sama jest, zwłaszcza w tych porach, źródłem hałasu. Potencjalnie może to być także źródło hałasu nocnego, czego jednak nie odnotowano w badaniach. Warto jednak podkreślić, że natężenie nieprzyjemnych dźwięków jest w strefie centralnej najniższe, co pozwala upatrywać w ruchu komunikacyjnym na obrzeżach osiedla głównej przyczyny dyskomfortu w klimacie akustycznym. W trakcie weekendu najwyższe wartości hałasu komunikacyjnego (60–68 dB(A)) odnotowano – ponownie – dla ul. Filaretów, jednak miało to miejsce w porze popołudniowej (Rys. 6). Można to tłumaczyć przemieszczaniem się mieszkańców do centrum w celach rozrywkowo-kulturalnych. Jednocześnie dla strefy centralnej osiedla odnotowano większe zróżnicowanie w porównaniu z dniem powszednim. W porze

wieczornej (Rys. 7) hałas był tam nieznacznie większy (o ok. 5 dB(A)), natomiast w ciągu dnia zaobserwowano mniej jednolity (wahania od 45 do 51 dB(A)) rozkład hałasu (Rys. 5, Rys. 6).



Rys. 5. Rozkład hałasu w porze porannej w weekend



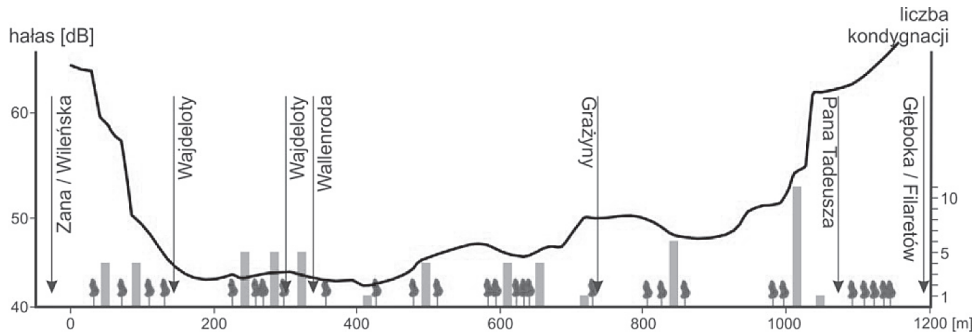
Rys. 6. Rozkład hałasu w porze popołudniowej w weekend





Rys. 7. Rozkład hałasu w porze wieczornej w weekend

Wszystkie rysunki ukazują – z pewnym uogólnieniem – koncentryczność rozkładu hałasu. Nie jest to jednak tylko prosta zależność wartości od odległości od głównych źródeł dźwięku (dróg). Odpowiednio zaprojektowana, równoległa zabudowa mieszkaniowa tworzy barierę dla hałasu. Budynki odbijają dźwięk, stanowiąc dla niego barierę, ale mogą także powodować zwiększenie natężenia hałasu przed budynkiem, od strony źródła dźwięku. Funkcję tego rodzaju spełniają zarówno wysokie wieżowce (Rys. 8), jak i dużo niższe obiekty. Przykładem może być szkoła przy ul. Wileńskiej, przez boisko której hałas z ulicy przedostaje się bez zakłóceń, redukuje go natomiast budynek. W dzień roboczy w porze porannej i popołudniowej różnica natężenia dźwięku przy szkole pomiędzy stroną od ul. Wileńskiej, a stroną od ul. Wajdeloty sięga 15 dB(A) (ok. 65 – ok. 50 dB(A)). Sytuacja taka w sposób wyraźny dotyczy przede wszystkim budynków na obrzeżach osiedla. Innym przykładem może być kościół, choć tu różnice są nieco niższe (ok. 10 dB(A)). Wynika to po części z ukształtowania terenu (kościół stoi na wyniesieniu względem sąsiedniej, dwujezdniowej ul. Filaretów), a po części z niejednorodności bryły kompleksu, którego zasadnicza, nieregularna i wysoka część otoczona jest partelową zabudową towarzyszącą. Zabudowa wewnątrzosiedlowa jest zróżnicowana, jeśli chodzi o orientację, jednak – jak pokazują mapy – natężenie i rozkład hałasu wewnątrz osiedla nie wymaga, aby budynki pełniły taką rolę. Uliczki osiedlowe nie generują dużego hałasu (do ok. 52 dB(A)), a w miejscach, w których mogłyby stać się korytarzami dla dźwięków spoza osiedla, zabudowa odgrywa pewną rolę minimalizującą hałas (ul. Rymwida, wjazd od ul. Filaretów – ok. 60 dB(A)). Rozkład pokazuje także wpływ czynnika niewidocznego na mapach, a mianowicie rzeźby terenu. Północna część ul. Filaretów oraz ul. Głęboka są znacznie obniżone w stosunku do osiedla, co powoduje szybki spadek poziomu dźwięku w nieznacznej odległości od ulic. Jednocześnie na rzeźbę terenu nakłada się wpływ czynnika zasygnalizowanego na Rys. 1 i pokazanego na przekroju (Rys. 8), a mianowicie roślinności – wysokich, gęsto zasadzonych drzew liściastych. Pełnią one funkcję bariery dźwiękowej również w centralnej części osiedla.



Rys. 8. Przekrój przez osiedle i powierzchnię hałasu (wyjaśnienia w tekście)

Zaprezentowane wyniki interpolacji są z technicznego punktu widzenia zbiorem danych w modelu rastrowym. Jako model ciągły prezentują również powierzchnię, która może być traktowana jako trójwymiarowa. Otwiera to możliwości dalszych analiz wyników pomiarów. Przykładem może być opracowanie przekrojów, ukazujących nie tylko zróżnicowanie hałasu, ale także wpływ elementów przestrzeni osiedla na propagację dźwięku. Na Rys. 8 przedstawiono przekrój opracowany dla pory porannej dnia powszedniego wykonany na linii od skrzyżowania ul. Zana i ul. Wileńskiej do skrzyżowania ul. Filaretów i ul. Głębokiej. Czerwona linia obrazuje zmienność natężenia dźwięku na tym ponadkilometrowym odcinku. Mimo drobnych niedokładności wynikających z natury interpolacji, widać wpływ kilku czynników na ową zmienność. Barierą dla hałasu są oznaczone na wykresie szarymi słupkami budynki, co wyraźnie obrazuje 10-piętrowy wieżowiec przy ul. Pana Tadeusza. Pewien wpływ zauważalny jest także dla budynków przy ul. Grażyny oraz niewysokich czterokondygnacyjnych bloków na początku analizowanej linii przekroju (choć tu nakłada się on na czynnik wzrostu odległości od źródła hałasu – skrzyżowania). Jako strefy emisji dźwięku można zidentyfikować ulice osiedlowe. Wzrost liczby decybeli widoczny jest dla ul. Grażyny („szczyt” wykresu sięgający wartości 50 dB(A)), a także dla ul. Wajdeloty (2–3 dB(A)). W kilku przypadkach zauważalna jest także rola zieleni, choć wartości obniżenia natężenia dźwięku również sięgają zaledwie kilku decybeli. Widoczny jest także centralny plac osiedla, który z racji funkcji może być źródłem podwyższonego poziomu dźwięku. Trzeba pamiętać, że taki wykres jest tylko liniowym przekrojem przez zjawisko trójwymiarowe, a zatem jego bieg powinien być odpowiednio (reprezentatywnie) dobrany, natomiast sama analiza nie może być prowadzona w oderwaniu od kompleksowej oceny przestrzennego rozkładu hałasu na całym analizowanym terenie.

## 7. Podsumowanie i wnioski

Prezentowana analiza ukazuje rozkład hałasu na osiedlu, którego struktura przestrzenna sięga założeń powojennego modernizmu. Wyniki pozwoliły sformułować wnioski o roli odpowiedniego usytuowania zabudowy względem źródeł hałasu. Ponadto pokazały, że niewydolny komunikacyjnie i zatłoczony układ ulic wewnętrznych nie jest źródłem nadmiernego, ciągłego i jednostajnego hałasu. Ulice, które zaprojektowane zostały do ruchu wewnętrznego pełnią obecnie funkcje parkingowe. W związku z tym ruch na nich odbywa się z niewielką (około 30 km/h) prędkością, na co wpływ mają także progi zwalniające, wyniesienia przejść dla pieszych oraz jakość części nawierzchni ulic. Natężenie dźwięku w ich rejonie nie odbiega znacznie od obszarów sąsiednich (kilka decybeli różnicy) z wyjątkiem połączenia

ul. Rymwida z ul. Filaretów, choć to głównie ta druga ulica jest źródłem hałasu. Dodatkowo określono strefę centralną osiedla, jako miejsce, które – z racji swojej rekreacyjnej roli – może w określonych sytuacjach i porach dnia być źródłem zwiększonego natężenia dźwięku, co mogą sugerować zmienności rozkładu hałasu w porach głównie popołudniowych.

Bardziej szczegółowo warto byłoby przyrzeć się roli zieleni osiedlowej, która może mieć wpływ na propagację hałasu w strefie centralnej. Wykazano na wykresie i w analizie map, że drzewa odgrywają pewną rolę bariery dźwiękowej, jednak sugeruje się przeprowadzenie porównawczych badań w porze zimowej, dzięki czemu ocenić będzie można wpływ zieleni w pełni sezonu wegetacyjnego.

## Literatura

- [1] Joachimowicz A. *Przestrzenna analiza hałasu na przykładzie wybranego osiedla Lubelskiej Spółdzielni Mieszkaniowej*. mps pracy magisterskiej z gospodarki przestrzennej napisanej pod kierunkiem dr. Kamila Nieścioruka w Katedrze Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji UP w Lublinie, Lublin 2018.
- [2] Małecki I., Engel Z., Lipowczan A., Sadowski J. *Problem of noise control in Poland on the way to european integration*. Proc. of NOISE CONTROL '95, Warszawa, 1995, 1–9.
- [3] *Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 czerwca 2002 r. odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku.*, Dziennik Urzędowy Wspólnoty Europejskiej, L 189, 18/07/2002.
- [4] Szopińska K. *Hałas drogowy jako czynnik wpływający na atrakcyjność miejskich terenów rekreacyjno-wypoczynkowych*. Logistyka 3 CD 1 (2015) 4740–4749.
- [5] Kiernan V. *Noise pollution robs kids of language skills*. New Scientist 154, 2081 (1997) 5.
- [6] Seidman M.D., Standring R.T. *Noise and quality of life*. International Journal of Environmental Research and Public Health 7 (2010) 3730–3738.
- [7] Bohatkiewicz J. *Modelowanie i ocena rozwiązań chroniących przed hałasem drogowym*. Politechnika Lubelska, Lublin, 2017.
- [8] Sentera A., Szczepańska A. *Dźwięk jako determinanta wartości nieruchomości mieszkalnych na przykładzie Olsztyna*, [w:] *Niematerialne wartości krajobrazów kulturowych*. (ed. Bernat S.). Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego PTG, 15, Polskie Towarzystwo Geograficzne. Komisja Krajobrazu Kulturowego, Sosnowiec, 2011, 213–223.
- [9] Krajewska M., Szopińska K. *Wycena lokalu mieszkalnego w strefie o podwyższonym poziomie hałasu – studium przypadku*. Biuletyn Stowarzyszenia Rzeczoznawców Majątkowych Województwa Wielkopolskiego 2 (46) (2016) 5–10.
- [10] Boczkowski A. *Analiza możliwości redukcji hałasu w środowisku miejskim*, [w:] *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. T. II* (ed. Knosala R.). Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2016, 343–352.
- [11] Kłopotowski M. *Klasyfikacje i zadania terenów zieleni we współczesnym mieście*. Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych Oddziału PAN w Lublinie 4 (2016) 7–25.
- [12] Sälzer E. *Ochrona przed hałasem w miastach*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1978.
- [13] Margaritis E., Kang J. *Relationship between urban green spaces and other features of urban morphology with traffic noise distribution*. Urban Forestry & Urban Greening 15 (2016) 174–185.
- [14] *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 10 listopada 2010 r. w sprawie sposobu ustalania wartości wskaźnika hałasu L (DWN)*. Dz. U. 2010 nr 215 poz. 1414.
- [15] *Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 15 października 2013 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku*. Dz. U. 2014 poz. 112.

- [16] Yilmaz G., Hocanlı Y. *Mapping of noise by using GIS in Şanlıurfa*. Environmental Monitoring and Assessment 121 (2006) 103–108.
- [17] Tang U.W., Wang Z.S. *Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution: results from a modelling system*. Environmental Modelling & Software 22 (2007) 1750–1764.
- [18] Wang B., Kang J. *Effects of urban morphology on the traffic noise distribution through noise mapping: a comparative study between UK and China*. Applied Acoustics 72 (2011) 556–568.
- [19] Sztubecka M., Skiba M. *Noise level arrangement in determined zones of homogenous development of green areas on the example of the spa park in Inowrocław*. Open Engineering 6 (2016) 524–531.
- [20] Paszkowski W. *Wykorzystanie oceny jakości akustycznej w zarządzaniu projektem redukcji hałasu drogowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Organizacja i Zarządzanie. 113 (2017) 355–364.
- [21] *Algorytmy obliczeń hałasu drogowego i kolejowego (opis polski)*. Instytut Ochrony Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Warszawa 2007.
- [22] Przesmycka E., Sosnowska M. *Przeobrażenia układów zieleni osiedlowej na przykładzie Zespołu im. Adama Mickiewicza Lubelskiej Spółdzielni Mieszkaniowej*. Czasopismo Techniczne. Architektura. 104 (5-A) (2007) 73–75.
- [23] Rzeczkowska E. *Rury w XX wieku*, [w:] *Lublin. Historia dzielnic. W 700. rocznicę lokacji miasta*. (ed. Chachaj J., Mącik H., Szulc D.). Lublin, 2017, 205–217.
- [24] Sosnowska M. *Modernizm powojenny na przykładzie wybranych lubelskich spółdzielczych (sic!) osiedli mieszkaniowych z lat 60. i 70. XX wieku*. Teza Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych Oddziału PAN w Lublinie 4b (2008) 203–211
- [25] Sosnowska M. *Problemy przestrzeni komunikacyjnych powojennych osiedli mieszkaniowych Lublina*. Teza Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych Oddziału PAN w Lublinie 5 (2009) 107–115.
- [26] Adamiec P., Trzaskowska E. *Rewitalizacja osiedlowych terenów zieleni – metody pracy na przykładzie Lubelskiej Spółdzielni Mieszkaniowej*, [w:] *Krajobrazy Lublina. Osiedla mieszkaniowe*. (ed. Adamiec P., Trzaskowska E.). Wydawnictwo KUL, Lublin, 2015, 133–150
- [27] Gągorowski A. *Komputerowa analiza hałasu drogowego z uwzględnieniem różnych metod obliczeniowych*. Logistyka 4 CD 1 (2012) 153–160.

## Analysis of spatial distribution of noise on Adam Mickiewicz housing estate in Lublin

Aleksandra Joachimowicz<sup>1</sup>, Kamil Nieścioruk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lublin, e-mail: olajoa@wp.pl

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering and Geodesy, University of Life Sciences in Lublin,  
S. Leszczyńskiego st. 7, 20-069 Lublin, e-mail: kamil.niescioruk@up.lublin.pl

**Abstract:** The paper deals with the problem of measuring and analysing noise in residential areas with relation to their vicinity and landscape- and architecture composition. Almost 70 points were selected to measure the noise three times per day and to create, using GIS tools, spatial image of the phenomenon. The resulting maps were analysed, pointing out sources of noise and factors reducing the sound spread. The further research ideas were suggested as well.

**Keywords:** noise, noise map, Lublin, GIS, housing estate, sources of noise.

# Miejsca piesze w przestrzeni miasta

Wacław Seruga

*Katedra Architektury i Urbanistyki, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska  
e-mail: waclawseruga@poczta.fm*

**Streszczenie:** Niniejszy artykuł został poświęcony zagadnieniom związanym z kształtowaniem miejsc pieszych w przestrzeniach miasta. Autor próbuje określić cechy jakie powinny posiadać miejsca piesze kształtujące miejską przestrzeń na podstawie przeprowadzonej analizy trzech zrealizowanych zespołów architektoniczno-urbanistycznych w miastach Słowenii, w drugiej dekadzie dwudziestego pierwszego wieku. Zaprezentowane przykłady o zróżnicowanym programie i funkcji zlokalizowane w różnych uwarunkowaniach potwierdziły tezę, że miejsca piesze stanowią miejsca węzłowe w mieście. Atrakcyjnie kształtowane miejsca piesze harmonijnie powiązane z otaczającą architekturą oraz kontekstem przestrzennym mają wpływ na integrację przestrzeni w mieście. Miejsca piesze jako miejsca węzłowe w mieście odgrywają w przestrzeniach miast istotną rolę bowiem stanowią wielofunkcyjne płaszczyzny skupiające podstawowy ruch pieszy zapewniając wszelkie kontakty międzyludzkie intelektualne oraz zawodowe, towarzyskie, edukacyjne etc. bardzo charakterystyczne dla przestrzeni publicznych. Mają też wpływ na scalanie zintegrowanych przestrzeni w mieście.

**Słowa kluczowe:** miejsca piesze, przestrzeń miasta.

## 1. Wprowadzenie

Współczesna przestrzeń miejska europejskich miast jest znacznie zróżnicowana pod względem lokalizacji, klimatu, wielkości, a także rozwiązań funkcjonalno-przestrzennych oraz programowych zespołów architektoniczno-urbanistycznych, kompozycji przestrzennej, a także związków ze środowiskiem przyrodniczym oraz zrównoważonym środowiskiem mieszkaniowym. Równocześnie posiada wspólne charakterystyczne cechy historyczne związane ze spuścizną i dziedzictwem kulturowym oraz europejskimi korzeniami i wartościami. Tradycyjna struktura miast europejskich oparta o siatkę ulic i kwartałów została zaakceptowana przez społeczeństwa, a jej zasady kształtowania zostały przyjęte we współczesnych rozwiązaniach przestrzeni miejskich.

Do wielu miejsc węzłowych w mieście należy przede wszystkim zaliczyć miejsca piesze, które stanowiły, stanowią i będą nadal stanowić rolę miejsc skupiających wszelki ruch pieszy o dużej aktywności społecznej związanej z działalnością z zakresu kultury, usług, rozrywki, rekreacji, administracji etc. W skali miasta miejsca piesze pełnią rolę zworników układów komunikacyjnych, funkcjonalno-przestrzennych i kompozycyjnych w strefach śródmiejskich oraz miejskich. Strefy śródmiejskie oraz centra współczesnych europejskich o różnej wielkości miast tworzą w ramach działań związanych z przekształceniami o różnorodnym charakterze; modernizacyjnym, rehabilitacyjnym, rewitalizacyjnym etc. miejsca węzłowe, wśród których dominującą rolę pełnią atrakcyjnie kształtowane miejskie piesze przestrzenie publiczne.

Miejsca piesze w strukturach miast historycznych, stanowią współczesną kontynuację w kształtowaniu przestrzeni miejskich; agory, forum, placu, rynku, ulicy pieszej etc. Współcześnie kreowane są w oparciu o dostępność mierzoną parametrami dojścia pieszego oraz o kontekst funkcjonalno-przestrzenny w zależności od lokalizacji w mieście. Niniejszy



artykuł dotyczy kształtowania miejsc pieszych w strukturach miejskich poza strefami śródmiejskimi w środowisku mieszkaniowym.

W związku z powyższym warto postawić pytanie – jakie cechy powinny posiadać miejsca piesze kształtujące miejską przestrzeń. W celu zilustrowania omawianych problemów posłużyłem się trzema przykładami zrealizowanych zespołów architektoniczno-urbanistycznych w miastach Słowenii w drugiej dekadzie dwudziestego pierwszego wieku. Zostały one poddane analizie pod kątem wpływu elementów przyrodniczych, kontekstu przestrzennego i kulturowego, lokalizacji, kompozycji przestrzennej, formy architektonicznej, percepcji i innych na atrakcyjność miejsc pieszych kształtujących przestrzeń miejską.

## 2. Przykład 1. Promenada w Velenje – 2015<sup>1</sup> Słowenia (Fot. 1–9)

Promenada jest jedną z centralnych osi centrum Velenje, nowego modernistycznego miasta powstałego w latach 1950–1959 w Słowenii, zaprojektowanego zgodnie z ideą miasta ogrodu. Renowacja promenady stanowi pierwszy etap rewitalizacji centrum miasta, która przebiega pod hasłem „Więcej zieleni i więcej funkcji”. Celem rewitalizacji jest wprowadzenie brakujących funkcji do centrum oraz odzyskanie oryginalnego charakteru miasta w parku. W wyniku transformacji promenada przekształciła się w główną oś kompozycyjną miasta, stanowiąc bardzo atrakcyjną pieszą przestrzeń publiczną o dużej aktywności, która skupia najważniejsze funkcje miasta.

Promenada piesza skupia dwie podstawowe funkcje:

- komunikacyjną, która zapewnia dostępność pieszą użytkownikom do kompleksu szkół średnich i centrum opieki zdrowotnej oraz do funkcji centro twórczych miasta.
- rekreacyjno-spacerową, która zapewnia różne formy wypoczynku dla wszystkich mieszkańców.

Początek promenady stanowi dwupoziomowy parking z funkcją handlową o bardzo oryginalnej architekturze nawiązującej do parkowego otoczenia. Koniec promenady stanowi centrum miasta. Część środkowa promenady, a zarazem punkt kulminacyjny założenia stanowi nowy amfiteatr usytuowany po obu stromych brzegach rzeki Paka, który przecina promenada. Amfiteatralnie schodzące do koryta rzeki szerokie betonowe schody mają przywrócić miastu rzekę, która dotychczas przepływała w bardzo stromym korycie niedostępnym dla społeczności miasta. Atrakcyjny oraz oryginalnie kształtowany amfiteatr nad rzeką z nowym mostem staje się głównym akcentem kompozycyjnego założenia oraz centrum aktywności przestrzeni publicznej w mieście.

Promenada jako miejsce piesze została kreatywnie ukształtowana poprzez wprowadzenie geometrycznie i dynamicznie kształtowanych betonowych płyt wyodrębniając w małej architekturze posadzki przestrzenie do siedzenia. Pasmowe założenie placowe przenikając się płynnie z wysoką zielenią po obu stronach wciąga do kompozycji istniejącą architekturę otoczenia.

Powstaje także nowa architektura wkomponowana w oś promenady, nowoczesny budynek parkingu dwupoziomowego z funkcją handlową powstały w ramach programu rewitalizacji miasta. Jego falująca elewacja, która została wykonana z perforowanych arkuszy stali, mocowanych na stalowych słupkach nawiązuje do bezpośredniego założenia parkowego (Fot. 3).

<sup>1</sup> Promenada w Velenje została zaprojektowana w 2014 roku przez architektów Enota a zrealizowana w 2015 roku. Lokalizacja: Trg młodości 6, 3320 Velenje, Słowenia. Powierzchnia promenady: 17020,00 m kw. Miasto Velenje jest zlokalizowane w północno-wschodniej części Słowenii. Liczy 33800 mieszkańców. Jest piątym co do wielkości i jednym z najnowszych miast Słowenii. Wybudowano je bardzo szybko w latach 50-tych XX wieku, gdy rozwijało się górnictwo węgla kamiennego. Velenje to interesujący przykład socjalistycznej urbanistyki jugosłowiańskiej. Miasto jest jasne i przestronne, dzięki wysokim blokom mieszkalnym i placom. „Velenje Tity” jak nazwano je na cześć Josipa Broza-Tity zostało ukończone w 1959 roku [8]. Źródło: <http://www.archdaily.com/636611/promenada-enota> (odsłona 04.08.2017).



Rewitalizowana promenada poprzez atrakcyjność oraz jakość rozwiązań przestrzennych i architektonicznych, a także poprzez wciągnięcie do kompozycji przestrzennej rzeki z amfiteatralnym założeniem wodnym wraz z towarzyszącym ciągiem zieleni oraz otaczającej istniejącej modernistycznej architektury z założeniem parkowym stwarza nową jakość zintegrowanej przestrzeni miejskiej. Równocześnie rewitalizowana promenada scalając wyżej wymienione poszczególne elementy funkcjonalne otoczenia w jedną całość porządkuje oraz wprowadza ład w przestrzeni miasta. Rzeka wraz z towarzyszącym ciągiem wysokiej zieleni odgrywa ważną rolę czynnika miastotwórczego w zintegrowanej przestrzeni miejskiej. Stanowiąc ważne miejsce została wyeksponowana w rewitalizowanej przestrzeni.

Fot. 1.



Fot. 2.

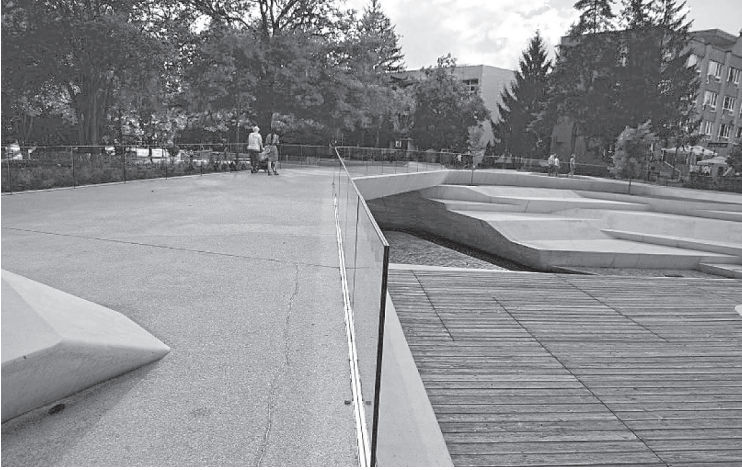


Fot. 1.–2. Promenada w Velenje, Słowenia. Kreatywnie ukształtowana posadzka z betonowych płyt pieszej promenady. Fot. Waclaw Seruga 2017



Fot. 3. Falująca elewacja z perforowanych arkuszy stali dwupoziomowego parkingu usytuowanego na osi promenady nawiązuje do parkowego otoczenia. Fot. Waclaw Seruga 2017

Fot. 4.



Fot. 5.



Fot. 6.



Fot. 4.–6. Amfiteatralne założenie wodne na skrzyżowaniu promenady z rzeką Paka stanowi kulminacyjny punkt kompozycyjny przestrzeni miasta. Fot. Wacław Seruga 2017



Fot. 7.



Fot. 8.



Fot. 9.



Fot. 7.–9. Atrakcyjny amfiteatr harmonijnie powiązany z rzeką stanowi centrum aktywności przestrzeni publicznej w mieście. Fot. Waław Seruga 2017

### 3. Przykład 2. Brick Neighbourhood w Lublanie – 2014<sup>2</sup>, Housing Brdo Unit F5 w Lublanie – 2015<sup>3</sup>, Słowenia (Fot. 10–21)

W ramach krajowego programu mieszkaniowego Słowenia promuje budownictwo mieszkaniowe. Skuteczna strategia dotycząca budownictwa publicznego jest jednym z podstawowych elementów działań miasta Lublany zorientowanego na jakość i zrównoważony rozwój. W południowej części Lublany realizowany jest obecnie jeden z największych kompleksów osiedli mieszkaniowych w Słowenii, w ramach którego zostały zrealizowane zespoły mieszkaniowe Brick Neighbourhood oraz Housing Brdo Unit F5.

Oba zespoły mieszkaniowe charakteryzuje przyjęta wspólna idea rozwiązania osiedla oparta na linearnie prowadzonym ciągu pieszym przestrzeni publicznej skupiającej funkcje komunikacyjne doprowadzające mieszkańców do mieszkań zlokalizowanych po obu stronach ciągu pieszego, a zarazem tereny rekreacyjne zawierające różnorodne urządzenia do wypoczynku. Znajdują się tu place zabaw dla dzieci, urządzone miejsca do wypoczynku, zieleń oraz oryginalnie kształtowana mała architektura etc. Całość układu harmonijnie wpisuje się w topografię terenu wiążąc przestrzenie i kompozycyjnie zespoły budynków mieszkalnych. Początek ciągu pieszego stanowi „brama wejściowa” w architekturze horyzontalnego budynku handlowego usytuowanego w zespole Housing Brdo Unit F5 na styku ulicy zapewniającej dostępność komunikacyjną do osiedla.

„Jak ustalić jasną, przestrzenną, materialną i społeczną tożsamość” – odpowiedź na to pytanie autorów projektu wpłynęła na jakość rozwiązań funkcjonalno-przestrzennych oraz zintegrowanie przyszłych mieszkańców z miejscem zamieszkania w zespole mieszkaniowym Brick Neighbourhood. Stąd w strukturze zespołu mieszkaniowego pojawiły się duże przestrzenie i jasne przestrzenie między budynkami oraz wybór cegieł jako materiału pochodzącego z cegielni, która kiedyś stała w miejscu zrealizowanego zespołu. Cegły stanowią okazję do wyrażenia dodatkowej mikrostruktury powierzchni elewacyjnej. Charakterystyczne elewacje wykonane zostały z cegły, która dzięki zastosowaniu odpowiedniego kształtu (ścięty narożnik) pozwala na otrzymanie regularnego wzoru łamiącego monotonię ścian. Powyższe aspekty pozwoliły na budowę unikalnej tożsamości dla przyszłej społeczności. W przestrzeniach publicznych na ścianach oraz drzwiach wypisane są cytaty poetów, każdy z budynków ma swojego „patrona”, z którego poezją można się zapoznać. Wpłynęło to na identyfikację ze swoim otoczeniem, a zarazem wzbogaciło świadomość kulturową mieszkańców. W zespole budynków mieszkalnych liczących 185 mieszkań zastosowano 17 różnych typów mieszkań różniących się wielkością i wewnętrznym układem w celu zaspokojenia różnych potrzeb przyszłych mieszkańców. Balustrady balkonów wykonano z perforowanej blachy.

W rozwiązaniu przestrzennym zespołu mieszkaniowego Housing Brdo Unit F5 położono nacisk na orientację mieszkań i budynków w stosunku do stron świata, ekspozycję widokową na krajobraz oraz na relacje pomiędzy jednostką, a zbiorowością. Jakość życia staje się coraz ważniejsza. Jak definiujemy czas wolny, jaka jest nasza praca i relacje między czasem wolnym i pracą to problemy, które są kluczowe w projektowaniu nowoczesnego zespołu mieszkani-

2 Zespół mieszkaniowy Brick Neighbourhood został zrealizowany w 2014 roku, a zaprojektowany przez architektów: dekleva gregorič architekti. Lokalizacja: Cesta na Vrhovce 2, 1000 Lublana, Słowenia. Miasto Lublana liczy 250 000 mieszkańców. Źródło: <http://www.architravel.com/architravel/buildind/bric-neighbourhood/> (odsłona 04.08.2017). Zespół mieszkaniowy Housing Brdo Unit F5 został zrealizowany w 2015 roku, a zaprojektowany w 2014 roku przez architektów: multiplan architekti. Projekt Team: Aleš Žnidaršič, Katja Žlajpah, Vesna Vraničar, Petra Marinšek. Lokalizacja: Cesta na Brdo 109 1000 Lublana, Słowenia. Powierzchnia: 18562,00 mkw. Źródło: <http://www.archdaily.com/771224/housing-brdo-unit-f5-multiplan-architekti> (odsłona 04.08.2017)

3 Zespół mieszkaniowy Housing Brdo Unit F5 został zrealizowany w 2015 roku, a zaprojektowany w 2014 roku przez architektów: multiplan architekti. Projekt Team: Aleš Žnidaršič, Katja Žlajpah, Vesna Vraničar, Petra Marinšek. Lokalizacja: Cesta na Brdo 109 1000 Lublana, Słowenia. Powierzchnia: 18562,00 mkw. Źródło: <http://www.archdaily.com/771224/housing-brdo-unit-f5-multiplan-architekti> (odsłona 04.08.2017)



wego. W wyniku powyższego pojawiły się w architekturze otwarte systemy mieszkań zdolne do zmian funkcjonalnych i adaptacji w celu zaspokojenia potrzeb przyszłych mieszkańców. Zespół mieszkaniowy składa się z 272 mieszkań w trzech typach budynków mieszkalnych o łącznej powierzchni 27500,00 m<sup>2</sup> i 16500,00 m<sup>2</sup> garażu podziemnego. Cechą charakterystyczną w architekturze budynków są balkony w kształcie przewróconej litery L. Pomiedzy budynkami usytuowano tereny rekreacyjne dostępne dla mieszkańców osiedla.

Linearnie kształtowaną przestrzeń ciągu pieszego cechuje atrakcyjność oraz społeczna aktywność jako miejsca spotkań, kontaktów międzyludzkich, wypoczynku etc. Dominujące w przestrzeni miejsca piesze stanowią najważniejsze miejsca w osiedlu wiążąc elementy środowiska przyrodniczego takie jak zielen, woda etc. z kompozycją przestrzenną zespołów architektoniczno-urbanistycznych. Linearnie kształtowany ciąg pieszy stanowi miejsce węzłowe w osiedlu mieszkaniowym. Wpływa na identyfikację mieszkańców z miejscem zamieszkania oraz unikalną tożsamość miejsca, a także na integrację miejskiej przestrzeni.



Fot. 10.



Fot. 11.



Fot. 12.



Fot. 13.



Fot. 14.



Fot. 15.

Fot. 10.–15. Zespoły mieszkaniowe Brick Neighbourhood oraz Housing Brdo Unit F5 w Lublanie – Słowenia. Linearnie kształtowany ciąg pieszy identyfikuje mieszkańców z miejscem zamieszkania oraz wpływa na unikalną tożsamość miejsca. Fot. Waclaw Seruga 2017

Fot. 16.



Fot. 17.



Fot. 18.



Fot. 16.–18. Architektura mieszkaniowa integrująca miejską przestrzeń. Fot. Wacław Seruga 2017



Fot. 19.



Fot. 20.



Fot. 21.



Fot. 19.–21. Miejsca piesze stanowiące miejsca węzłowe w mieście kształtują miejską przestrzeń osiedla mieszkaniowego w Lublanie. Fot. Waław Seruga 2017

Fot. 22.



Fot. 23.



Fot. 24.



Fot. 22.–24. Housing Sotocje w Kranju-Słowenia. Rekreacyjny ciąg pieszy założenia urbanistycznego integralnie powiązany przestrzennie z rekreacyjnymi wnętrzami mieszkalnymi. Fot. Wacław Seruga 2017



Fot. 25.



Fot. 26.



Fot. 27.



Fot. 25.–27. Architektura budynków mieszkalnych harmonijnie wkomponowana w rekreacyjne otoczenie rzeki Savy. Fot. Waclaw Seruga 2017

#### 4. Przykład 3. Housing Sotocje w Kranju – 2010<sup>4</sup> Słowenia (Fot. 22–27)

Zespół mieszkaniowy Sotocje został zlokalizowany u zbiegu rzek Sava i Kokra w Kranju, w dziewiętnastowiecznym obszarze przemysłowym na styku z historycznym centrum oraz terenami rekreacyjnymi o wysokich walorach przyrodniczych. Upřednio stała tam fabryka kauczuku powodując silne zanieczyszczenie terenu. Obecnie obszar ten jest przekształcany i powstają tam zespoły mieszkaniowe o dużych walorach ekologicznych w zrównoważonym środowisku mieszkaniowym. Zespół mieszkaniowy Sotocje liczący 142 mieszkań został usytuowany w widłach obu rzek na podniesionej naturalnej zielonej platformie zawierającej garaże tuż pod dawnym średniowiecznym miastem położonym na wzgórzu.

Kompozycja przestrzenna zespołu oparta została na osi pieszego rekreacyjnego zielonego ciągu usytuowanego wzdłuż brzegu rzeki Savy powiązanego z zielonymi rekreacyjnymi wnętrzami kształtowanymi przez czterokondygnacyjne budynki mieszkalne. Rekreacyjny, a zarazem integrujący ciąg pieszy jest elementem wiążącym przestrzenie rekreacyjne zespołu architektonicznego z przestrzenią środowiska przyrodniczego rzeki Savy. Architektura budynków mieszkalnych jest niezwykle lapidarna w formie.

W elewacji zastosowano perforowane panele aluminiowe. Wszystkie mieszkania bardzo proste w układzie posiadają balkony otaczające cały budynek od zewnątrz tworząc efekt „głębokiej fasady” pomiędzy dwoma warstwami elewacji: „termicznej” i „wizualnej”. Zespół mieszkaniowy Sotocje zrealizowany w wyniku rewitalizacji zdegradowanych terenów poprzemysłowych scala średniowieczne miasto położone na wzgórzu w rejonie rzeki Savy z istniejącą tkanką miejską podnosząc zarazem jakość i atrakcyjność miejskiej przestrzeni.

#### 5. Podsumowanie

Zaprezentowane przykłady zespołów architektoniczno-urbanistycznych potwierdzają tezę, że miejsca piesze stanowią miejsca węzłowe w mieście. Miejsca piesze to swoiste hybrydy pełniące rolę wielofunkcyjnych przestrzeni zmieniających swoje oblicze, charakter i klimat w zależności od potrzeb. Mogą pełnić rolę przestrzeni publicznych o dużej aktywności komunikacyjnej jako miejsca spotkań, różnorodnych imprez, koncertów, kiermaszy, wypoczynku, rozrywki etc. o dominującym programie np. kulturalnym, usługowym, rekreacyjnym etc. Atrakcyjnie kształtowane miejsca piesze harmonijnie powiązane z otaczającą architekturą oraz kontekstem przestrzennym mają wpływ na integrację przestrzeni w mieście.

Miejsca piesze kreuja w przestrzeniach miejskich formy małej architektury i rzeźby oraz różnorakie geometryczne kształty jak promenady, place, ciągi i ulice piesze, etc. powiązane z elementami natury: wody, zieleni, rzeźby terenu itp. Występują w różnych skalach w miastach o różnej wielkości tworząc indywidualny układ sieciowy wzajemnych powiązań funkcjonalno-przestrzennych i kompozycyjnych. Zwykle towarzyszą im ciągi zieleni parkowej oraz zbiorniki lub ciekі wodne.

Miejsca piesze kształtujące miejskie przestrzenie posiadają między innymi następujące cechy:

<sup>4</sup> Housing Sotocje został zaprojektowany w 2009 roku, a zrealizowany w 2010 roku w Słowenii w miejscowości Kranj przy ul. Savska cesta przez architektów Bevk Perović architekti. Projekt Team: Matija Bevk, Vasa J. Perović, Davor Počivašek, Ida Sedušak. Kranj to czwarte pod względem wielkości słoweńskie miasto i ośrodek przemysłowy. Posiada ładną starówkę rozciągającą się na cyplu w miejscu, gdzie kiedyś osiedlili się Celtowie, a później Rzymianie. Miasto zlokalizowane 15 km od Lublany, obecnie liczy 53000 mieszkańców. Źródło: <http://www.archdaily.com/81163/housing-sotocje-bevk-perovic-architekti> (odsłona 04.08.2017)

- atrakcyjność kształtowania miejskich przestrzeni,
- harmonia z otaczającą architekturą,
- wysoka jakość rozwiązań elementów małej architektury, posadzki, rzeźby etc.,
- przyjazna percepcja użytkowników tych przestrzeni,
- w rozwiązaniach funkcjonalno-przestrzennych uwzględniają kontekst przestrzenny i kulturowy oraz elementy środowiska przyrodniczego jak woda, zieleń etc.
- posiadają niezwykle walory kompozycyjne.

Miejsca piesze jako miejsca węzłowe w mieście odgrywają w przestrzeniach miasta istotną rolę, bowiem stanowią wielofunkcyjne płaszczyzny skupiające podstawowy ruch pieszy zapewniając wszelkie kontakty międzyludzkie intelektualne oraz zawodowe, towarzyskie, edukacyjne etc. bardzo charakterystyczne dla przestrzeni publicznych. Mają też wpływ na scalanie zintegrowanych przestrzeni w mieście.

## Bibliografia

- [1] Gzell S. *Wykłady o współczesnej urbanistyce*, Warszawa 2015, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [2] Kosiński W. *Paradygmat miasta 21 wieku*, Politechnika Krakowska 2016 r.
- [3] Pluta K. *Przestrzenie publiczne miast europejskich*. Projektowanie urbanistyczne. Warszawa 2014. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [4] Podhalański B. *Integrowanie przestrzeni metropolitalnych*, Monografia 443 seria Architektura, Wydawnictwo: Politechnika Krakowska, Kraków 2013 r.
- [5] Seruga W. *Architektura kontekstu*. Monografia – Architektura 1/2014; Wydawnictwo: Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Kielce 2014r.
- [6] Seruga W. *Kreacja w przestrzeni miasta*. Rozdział [w:] Architektura kontekstu. Monografia – Architektura 1/2014, str. 84–104. Wydawnictwo: Politechnika Świętokrzyska. Wydział Budownictwa i Architektury, Kielce 2014 r.
- [7] Seruga W. *Rekreacja w małych zespołach mieszkaniowych* [w:] Rekreacja w miejscu zamieszkania, Środowisko Mieszkaniowe/Housing Environment nr 16/2016, str. 132–171; Wydawnictwo: Katedra Kształtowania Środowiska Mieszkaniowego, Wydział Architektury, Politechnika Krakowska, Kraków 2016 r.
- [8] Słowenia – Przewodnik Wiedzy i Życia, Warszawa 2013.
- [9] Wrana J. *Rola i znaczenie architektury w procesie scalania struktury przestrzennej miasta na przykładzie Lublina*. Monografia. Wydawnictwo: Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury. Lublin 2014 r.

## Pedestrian areas in the space of a city

Wacław Seruga

*Department of Architecture and Town Planning, Faculty of Civil Engineering and Architecture,  
Kielce University of Technology, e-mail: waclawseruga@poczta.fm*

**Abstract:** This article has been devoted to problems associated with the shaping of pedestrian areas within the spaces of a city. The author attempts to determine the characteristics

that pedestrian spaces – which shape urban space – should possess on the basis of an analysis of three built architectural and urban complexes in the cities of Slovenia dated to the second decade of the twenty first century.

The examples that were presented – each having a different programme and form of use, as well as being located in different conditions – confirmed the thesis that pedestrian areas constitute node areas within a city. Attractively shaped pedestrian areas connected with the surrounding architecture and spatial context have an impact on the integration of spaces within a city.

Pedestrian areas – as node areas within a city – play a significant part within the spaces of cities, as they constitute mixed-use planes that focus basic pedestrian traffic, providing all manners of interpersonal contact: intellectual and professional, social, educational, etc., which is very characteristic of public spaces. They also have an impact on the merging of integrated spaces within a city.

**Keywords:** pedestrian areas, the space of a city.