

Spis treści

Tadeusz CHYŻY, Monika MACKIEWICZ

Koncepcja elementów skończonych w obliczeniach konstrukcji o dużych zmianach sztywności
Conception of finite elements for calculations of constructions with large stiffness changes 161

Artur DUCHACZEK, Zbigniew MAŃKO

Wpływ wielkości otworów konstrukcyjnych na wyężenie poprzecznicę mostu składanego typu DMS-65
Impact of size of assembly holes on effort of DMS-65 type assembled bridge transom 167

Dorota KRAWCZYK, Urszula ŻYŁKIEWICZ

Analiza możliwości zastosowania różnych źródeł ciepła dla budynku Ośrodka Kultury i Sportu
The analysis of different energy sources for the building of Culture and Sport Centre 173

Małgorzata LELUSZ

Ocena zawartości aktywnego SiO₂ w popiołach lotnych wytwarzanych w obiektach energetycznych północno-wschodniej Polski
Evaluation of reactive SiO₂ content in fly ashes from power plants in north-eastern Poland 179

Joanna PIOTROWSKA-WORONIAK, Grzegorz WORONIAK

Efekty energetyczne, ekonomiczne i ekologiczne termomodernizacji budynku hotelowego w Białymstoku
The energetical, economical and ecological effects of the hotel building thermomodernization in Bialystok 185

Jerzy SĘKOWSKI, Magdalena GAWLIK

Posadowienie budynku szkolnego w ujęciu norm: PN-59/B-03020, PN-81/B-03020 i PN-EN-1997-1
School building foundation according to Polish standards: PN-59/B-03020, PN-81/B-03020 and PN-EN-1997-1 195

Damian SIWIK, Czesław MIEDZIAŁOWSKI

Głębokie posadowienia budynków i metody ich analizy statycznej
Deep buildings foundations and their static analysis methods 201

Paweł SZKLENNIK

Numeryczne analizy bezpośredniego ścinania gruntu niespoistego z zastosowaniem metody elementów dyskretnych
Numerical analyses of the direct shearing of non-cohesive soil using the discrete element method 211

Justyna TOPOLAŃSKA, Tomasz Janusz TELESZEWSKI

Pompa ciepła na tle innych źródeł ciepła w przypadku budynków wielorodzinnych
Heat pump compared to other heat sources in the case of multi-family buildings 217

Piotr Krzysztof TUZ, Joanna GWOŹDZIEJ-MAZUR

Analiza przepływów w instalacjach wodociągowych w obiektach hotelowych
Analysis of flow in water supply systems in hotel buildings 225

Piotr Krzysztof TUZ, Joanna GWOŹDZIEJ-MAZUR

Wodomierze jednostrumieniowe klasy B-H po 5 latach eksploatacji w sieci wodociągowej
Single jet water meters in B-class (horizontal) after 5 year exploitation in water systems 231

Abstracts

Vol. 3 No. 4

Tadeusz CHYŻY, Monika MACKIEWICZ

Conception of finite elements for calculations of constructions with large stiffness changes

An original conception of finite elements with adjustable shape functions, depended of local changes of stiffness in sub-areas of the calculated construction model, is presented in the paper. Presented solution is called as elements with adaptive shape functions, because described by them deformation field can be modified during the calculation process, according to local changes of stiffness. This conception can also be used for solving problems, where the local stiffness differences are the initial state. Examples of such solutions are presented in the paper. Performed computational studies show the validity of the concept and lead to correct solutions. The main advantage of the presented method is the reduction of finite elements number and the reduction of time-consuming procedures for reorganization the system geometry.

Artur DUCHACZEK, Zbigniew MAŃKO

Impact of size of assembly holes on effort of DMS-65 type assembled bridge transom

The author of the paper conducted a strength analysis of a cross-beam in a DMS-65 type assembled bridge with regard to the assessment of the impact of the size of assembly holes on its effort. In the analyses the finite element method (FEM) was employed, modelling the transom as a monocoque construction with the use of surface elements. It transpires from the conducted analysis that the existing assembly holes of 200 mm in diameter are not an optimum solution of that construction.

Dorota KRAWCZYK, Urszula ŻYŁKIEWICZ

The analysis of different energy sources for the building of Culture and Sport Centre

The article presents the comparison of three heat sources working for the public building. An economic analysis, including estimation and comparison of investment and operating costs for selected solutions was done. Moreover technical feasibility and environmental problems were discussed.

Małgorzata LELUSZ

Evaluation of reactive SiO₂ content in fly ashes from power plants in north-eastern Poland

In the presented paper the results of field-laboratory investigation concerning the fluctuation in reactive SiO₂ content in fly ashes from power plants in north-eastern Poland. Experiments were conditioned on the basis of the SiO₂ content evaluation depending on two factors: the fly ash source (factor A) and the reception sample period (factor B). The use of variance analysis in evaluating the collected data allowed to conclude that both of the considered factors significantly influenced the fly ashes SiO₂ contents. The fly ashes were monitored during seven months of the 2010/2011 heating season. The influence share of factor A was 64% whereas for the case of factor B it was 7%. This means that factor B influences less than factor A.

Joanna PIOTROWSKA-WORONIAK, Grzegorz WORONIAK

The energetical, economical and ecological effects of the hotel building thermomodernization in Białystok

In the hotel, built in the years 1973-1975, characterized by a high rate of annual heat demand for heating (342.84 kWh/m²year), a complex thermal modernization of the body building, the heating system and warm water one and a heat source were performed. The annual energy performance, as well as economical and ecological effects were determined, that can be obtained as a result of these improvements. The range of thermomodernization works carried out of the body building and modernization of the proposed technological solution using the old oil boiler to support renewable energy hot water heating were presented.

Jerzy SEKOWSKI, Magdalena GAWLIK

School building foundation according to Polish standards: PN-59/B-03020, PN-81/B-03020 and PN-EN-1997-1

A correctly founded structure needs to meet the ultimate limit states and the serviceability limit states (the limit states of allowed stress and allowed settlements). The knowledge on broadly defined geotechnics has developed, recently. Changes in design standards for the mentioned foundations were one of its consequences. In the last sixty years, the standards changed few times in Poland. Not only their philosophy was different, but also the calculation procedure. Since 2010, the Eurocode 7 has been currently applicable. In practice, its introduction will certainly take some time and the discussion concerning the former standards will take place. The presented paper is an attempt to take part in that discussion. It is based on the solution adopted for a structure with shallow foundation according to the PN-81/B-03020 standard. The paper presents the comparison between sizes of chosen pad foundations, as well as the strip foundation of the building, designed according to the PN-81/B-03020 standard and calculated according to the PN-59/B-03020 and PN-EN-1997-1 standards. There is no significant difference between the results. It may mean that, in the case of small buildings, the analysed standards give similar results in engineering calculations.

Damian SIWIK, Czesław MIEDZIAŁOWSKI

Deep buildings foundations and their static analysis methods

The paper presents execution methods of deep excavation. Computational methods currently in use, indicating specified by the researchers difficulties and problems in numerical analysis are presented. Directions of further development of the topic of deep foundation static analysis using the finite element method are given. Discussed issues are illustrated by calculation example, in which the influence of the deep building foundation on the displacement-stress state of soil and buildings in direct neighborhood was examined in each stages of implementation.

Paweł SZKLENNIK

Numerical analyses of the direct shearing of non-cohesive soil using the discrete element method

The paper presents results of the numerical simulations of the direct shearing of non-cohesive soil using two-dimensional discrete element method. Identification of contact stiffness parameters as well as sliding and rolling friction coefficients was the main subject of the work. Grain roughness and its shape effect were simulated by increasing friction parameters. Internal friction angles obtained by the numerical calculations were compared with the results of the laboratory tests and the values from the literature sources. It was shown that it is possible to simulate shear strength of soil samples with various grain size distribution using the discrete element method simplified to two dimensions.

Justyna TOPOLAŃSKA, Tomasz Janusz TELESZEWSKI

Heat pump compared to other heat sources in the case of multi-family buildings

The paper presents a characteristics of fuels and heat sources. Special concern was applied to heating with a heat pump. The economic and technical analysis of the use heat pump in multi-family building was performed. The heat pump was compared with another alternatives: heating oil, natural gas and pellets. For each systems of heat sources the total investment and operating costs were calculated. The heat pump had the least operating cost but the high investment cost.

Piotr Krzysztof TUZ, Joanna GWOŹDZIEJ-MAZUR

Analysis of flow in water supply systems in hotel buildings

There is discussion in Poland undertaken about decrease in water consumption in single-family housing facilitates as well as multi-family buildings. The structure of water consumption is well described in these facilities, but on the other hand there are many issues to clear regarding public buildings. The report presents outcomes of research on the water consumption in public buildings (hotels). The study presents detailed structure of water consumption, as well as graphs aimed at max and min level of water flow definition in buildings in question, which directly influences on a proper measuring device selection/choice, on the basis of which water charges are calculate.

Piotr Krzysztof TUZ, Joanna GWOŹDZIEJ-MAZUR

Single yet water meters in B-class (horizontal) after 5 year exploitation in water systems

Water meter in waterwork company is the basic measuring instrument for water consumption measuring, both pumped into the water network as well as at the final recipient. The largest group consists of devices within DN 15 and DN 20 sizes. More and more often, water companies decide to purchase and install water meters of a class C in the water supply network to reduce water losses. Selection of the type of the meter should be subjected to ex. quality of the water in the network. Single-Class B Meters have been the main water measuring device in many companies. The operation time period of water meters in the water network (legalization period) is in Poland five years. The paper presents a study on the metrological characteristics of single dry running meters of a Class B after 5 years of use in water distribution networks, in different water companies

KONCEPCJA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH W OBLICZENIACH KONSTRUKCJI O DUŻYCH ZMIANACH SZTYWNOŚCI

Tadeusz CHYŻY*, Monika MACKIEWICZ

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

Streszczenie: W referacie zaprezentowano oryginalną koncepcję elementów skończonych, w których można modyfikować pole odkształceń, dopasowując je do lokalnych zmian sztywności i geometrii podobszaru obliczanego modelu konstrukcji. Prezentowane rozwiązanie nazwano elementami o adaptatywnych funkcjach kształtu, ponieważ opisane nimi pole odkształceń może być modyfikowane w trakcie procesu obliczeniowego, w zależności od powstających lokalnych zmian geometrii i sztywności. Prezentowane rozwiązanie może też być wykorzystane w zagadnieniach stacjonarnych, gdzie lokalne różnice sztywności stanowią stan początkowy. Wykonane badania obliczeniowe wykazują słuszność koncepcji, która prowadzi do oczekiwanych wyników. Podstawową zaletą prezentowanej metody jest minimalizacja liczby elementów skończonych i eliminacja kosztownych obliczeniowo procedur reorganizacji siatki dyskretyzacji układu.

Słowa kluczowe: MES, pręt, belka, adaptatywne funkcje kształtu, pole odkształceń.

1. Wprowadzenie

W praktyce modelowania konstrukcji Metodą Elementów Skończonych MES (Zienkiewicz i in., 2005) czasami zachodzi konieczność definiowania obszarów o znacznie różniącej się charakterystyce sztywnościowej. Standardowo takie podobszary są wydzielane i opisane oddzielnie odpowiednimi elementami skończonymi. Takie podejście jest naturalne w przypadkach obliczeniowych, gdzie parametry geometrii i sztywności podobszarów są znane. Niekiedy jednak uzasadnione jest i niezbędne opisanie różnych podobszarów jednym elementem skończonym, przykładowo:

- gdy zmiany sztywności powstają w trakcie niestacjonarnego procesu obliczeniowego i mają wpływ na jego dalszy przebieg, na przykład: zarysowanie, pęknięcie czy zniszczenie elementu konstrukcji (Bąk i Stolarski, 1990);
- gdy istnieje potrzeba opisu konstrukcji warstwowych (belki, płyty) lub o nietypowych kształtach przekroju poprzecznego (belki);
- w zagadnieniach modelowania fazy pokrytycznej, procesu niszczenia i zachowania się elementów konstrukcji po jej uszkodzeniu lub zniszczeniu; przykładowo zjawisko wybuchu gazu wewnątrz budynku mieszkalnego może być bardzo destrukcyjne i prowadzić do zniszczenia konstrukcji poprzez rozwój

katastrofy postępującej lub poprzez jej defragmentację i „rozrzućenie” elementów budynku (Chyży, 2009);

W dalszej części artykułu Autorzy prezentują oryginalną metodę umożliwiającą opis jednym elementem podobszarów o różnych parametrach geometryczno-sztywnościowych, z zachowaniem odpowiedniej dokładności rozwiązania, którą uzyskano poprzez dopasowanie pola odkształceń z zastosowaniem adaptatywnych funkcji kształtu.

2. Koncepcja metody

Koncepcja prezentowanego rozwiązania została pokazana na przykładzie najprostszego elementu prętowego (rys. 1). Macierz sztywności elementu prętowego o dwóch węzłach definiowana standardowo jest wyznaczana według następującej procedury (Zienkiewicz i in., 2005; Chyży, 2009).

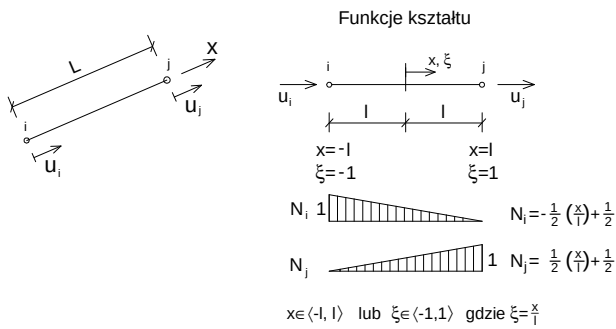
Macierz sztywności elementu wyznaczono z następującego równania:

$$\mathbf{K}_e = \int_V \mathbf{B}_e^T \cdot \mathbf{D}_e \cdot \mathbf{B}_e \cdot dV \quad (1)$$

gdzie: $\mathbf{B}_e$ jest macierzą odkształceń, $\mathbf{D}_e$ jest macierzą materiałową równą $[E]$, V jest obszarem całkowania,

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: t_chyzy@interia.pl

$L = 2l$ jest długością elementu prętowego pokazanego na rysunku 1.



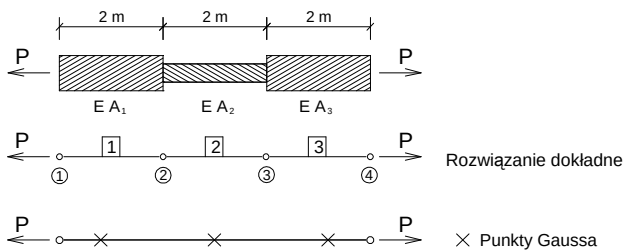
Rys. 1. Standardowe funkcje kształtu dla dwuwzłowego elementu prętowego

Z równania (1) otrzymuje się standardową macierz sztywności elementu skończonego, która może być zastosowana tylko do opisu podobszaru o stałej po długości sztywności EA:

$$\mathbf{K}_e = A \cdot E \cdot \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2 \cdot l} \cdot dx =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{EA}{2 \cdot l} & -\frac{EA}{2 \cdot l} \\ -\frac{EA}{2 \cdot l} & \frac{EA}{2 \cdot l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} \\ -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Aby rozwiązać przykład pokazany na rysunku 2 i uzyskać rozwiązanie dokładne, należy podzielić go na 3 elementy o sztywnościach EA_1 , EA_2 , EA_3 . To zadanie można również rozwiązać opisując fragment konstrukcji jednym elementem o 3 punktach Gaussa. Autorzy proponują jeszcze inne podejście, a mianowicie jeden element całkowany jawnie, w tym przypadku w 3 podobszarach.



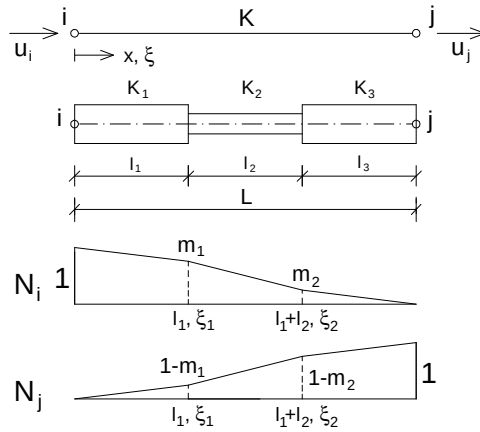
Rys. 2. Rozciągany fragment konstrukcji o zróżnicowanej sztywności

Koncepcja elementów całkowanych jawnie w podobszarach polega na podziale elementu na k części (podobszarów) i sumowaniu częściowych macierzy sztywności z każdego podobszaru, co wyraża się wzorem:

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_3 + \dots =$$

$$= \int_0^{l_1} \mathbf{K}_e^1(\xi) d\xi + \int_{l_1}^{l_1+l_2} \mathbf{K}_e^2(\xi) d\xi + \int_{l_1+l_2}^{l_1+l_2+l_3} \mathbf{K}_e^3(\xi) d\xi + \dots = \sum_{k=1}^n \mathbf{K}_e^k \quad (3)$$

Na rysunku 3 pokazano przykładowy element liniowy podzielony na 3 podobszary o różnej sztywności osiowej K_1 , K_2 , K_3 . Dalsze przekształcenia podano dla jednego podobszaru oznaczonego sztywnością $K_2 \equiv K_e^k$, ograniczonego współrzędnymi ξ_1 do ξ_2 , dla którego wartości brzegowe funkcji kształtu mają wartości odpowiednio m_1 , m_2 dla funkcji kształtu N_i , z dopełnieniem do jednostki dla funkcji kształtu N_j .



Rys. 3. Podział elementu na podprzestrzenie (podobszary)

Macierz sztywności podobszaru k jest wyznaczana z równania:

$$\mathbf{K}_e^k = \int_{V_k} \mathbf{B}_e^k \mathbf{D}_e^k \mathbf{B}_e^k dV_k \quad (4)$$

$$\mathbf{B}_e^k = \mathbf{L} \cdot \mathbf{N}_e^k = \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \right] \cdot [N_i^k, N_j^k] =$$

$$= \left[\frac{m_2 - m_1}{\xi_2 - \xi_1}, -\frac{m_2 - m_1}{\xi_2 - \xi_1} \right] = [b, -b], \quad \xi \in (-1, 1), \quad (5)$$

gdzie: $\mathbf{B}_e^k$ jest macierzą odkształceń podobszaru k , $\mathbf{D}_e^k$ jest macierzą materiałową podobszaru, $\mathbf{D}_e^k = [E_k]$, $\mathbf{N}_e^k$ jest macierzą funkcji kształtu w podobszarze k , daną wzorem:

$$\mathbf{N}_e^k = [N_i^k, N_j^k] =$$

$$= \left[\frac{m_2 - m_1}{\xi_2 - \xi_1} \cdot \xi + \frac{m_1 \cdot \xi_2 - m_2 \cdot \xi_1}{\xi_2 - \xi_1}, 1 - \left(\frac{m_2 - m_1}{\xi_2 - \xi_1} \cdot \xi + \frac{m_1 \cdot \xi_2 - m_2 \cdot \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} \right) \right] \quad (6)$$

W związku z tym po podstawieniu do równania (4) otrzymano:

$$\mathbf{K}_e^k = \int_{V_k} \mathbf{B}_e^k \mathbf{D}_e^k \mathbf{B}_e^k dV_k =$$

$$= A_k \cdot \int_{\xi_1}^{\xi_2} \begin{bmatrix} b \\ -b \end{bmatrix} \cdot [E_k] \cdot [b, -b] \cdot J \cdot d\xi \quad (7)$$

gdzie J jest Jacobianem przekształcenia równym $1/L$, skąd ostatecznie otrzymano:

$$\mathbf{K}_e^k = b^2 \cdot \frac{EA}{L} \cdot \int_{\xi_1}^{\xi_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} d\xi =$$

$$= \begin{bmatrix} b^2(\xi_2 - \xi_1) \cdot \frac{EA}{L} & -b^2(\xi_2 - \xi_1) \cdot \frac{EA}{L} \\ -b^2(\xi_2 - \xi_1) \cdot \frac{EA}{L} & b^2(\xi_2 - \xi_1) \cdot \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Wartości funkcji kształtu na granicach podobszaru m_1 i m_2 można wyznaczyć ze standardowego rozkładu liniowego pokazanego na rysunku 1. W tym konkretnym przykładzie wynosiłyby odpowiednio parami $(1,0; 0,666)_1$, $(0,666; 0,333)_2$, $(0,333; 0,0)_3$, gdzie indeksem dolnym oznaczono numer podobszaru. Oba z zaprezentowanych powyżej rozwiązań, czyli z pojedynczym elementem z 3 punktami całkowania Gaussa i z pojedynczym elementem całkowanym jawnie z trzema podobszarami, znacznie odbiegają od rozwiązania dokładnego. Błąd rozwiązania narasta wraz ze wzrostem różnicy sztywności, co przedstawiono w tabeli 1. Potwierdza to fakt, że przy dużych zmianach sztywności konieczne jest modyfikowanie pola odkształceń.

W dalszej części pracy przedstawiono koncepcję takiej modyfikacji, która polega na zastosowaniu linii łamanych w opisie funkcji kształtu. Wartości funkcji kształtu m_1 i m_2 , ogólnie m_i , (rys. 3) dopasowujących rozkład pola odkształceń wewnątrz podobszaru do zmian sztywności, proponuje się wyznaczyć ze wzoru (9) (Chyży i in., 1996) i formuł sumacyjnych (10) (11), które wyprowadzono przy założeniu, że podobszary tworzą układ szeregowo połączonych sprężyn (rys. 4) o sztywności $\mathbf{K}_e^k$, $k = 1, 2, \dots, n$ (n jest liczbą podobszarów – przedziałów całkowania):

$$m_i = \frac{\bar{k}}{k_i} \quad (9)$$

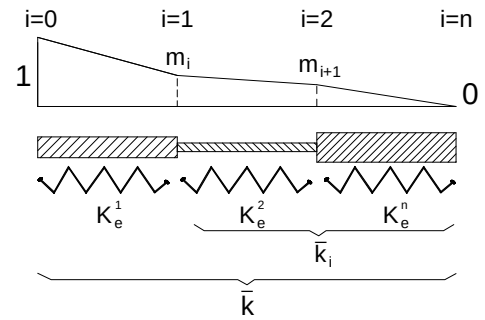
gdzie $\bar{k}$ oznacza sztywność wypadkową całego zespołu sprężyn opisaną wzorem:

$$\bar{k} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{K_e^k}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{\frac{E_k \cdot A_k}{l_k}}} \quad (10)$$

Natomiast $\bar{k}_i$ to sztywność wypadkowa części układu sprężyn do punktu, w którym obliczana jest wielkość m_i . Wartość $\bar{k}_i$ wyznaczana jest ze wzoru:

$$\bar{k}_i = \frac{1}{\sum_{k=n}^i \frac{1}{K_e^k}} = \frac{1}{\sum_{k=n}^i \frac{1}{\frac{E_k \cdot A_k}{l_k}}}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (11)$$

Zastosowanie łamanych funkcji kształtu, czyli dopasowanie pola odkształceń do zmian sztywności, prowadzi do uzyskania oczekiwanych wyników, co zostało zaprezentowane w tabeli 1.



Rys. 4. Geometryczna interpretacja wyznaczania wartości linii łamanej funkcji kształtu

Tab. 1. Porównanie wartości przemieszczeń elementu rozciąganego pokazanego na rysunku 2

Przemieszczenie przy określonym rozwiązaniu w cm	Przekrój				
	$A_1, A_3 = 100 \text{ cm}^2$ – stałe				
	$A_2 = 100 \text{ cm}^2$	$A_2 = 90 \text{ cm}^2$	$A_2 = 50 \text{ cm}^2$	$A_2 = 10 \text{ cm}^2$	$A_2 = 1 \text{ cm}^2$
Rozwiązanie dokładne	2,0000	2,0741	2,6667	8,0000	68,0000
Całkowanie Gaussa	2,0000	2,0930	2,5714	3,3333	3,5714
Elementy całkowane w podprzestrzeniach bez modyfikacji pola odkształceń	2,0000	2,0690	2,4000	2,8571	2,9851
Prezentowana metoda – elementy całkowane w podprzestrzeniach z modyfikacją pola odkształceń	2,0000	2,0741	2,6667	8,0000	68,0000

3. Test metody – element belkowy

Zaprezentowaną metodę zaadaptowano do analizy belek, w których występuje lokalne osłabienie materiału, na przykład belek zarysowanych lub pękających (zniszczenie).

Element belki wyprowadzono na bazie czterowęzłowego standardowego elementu tarczowego (Bathe, 1996). Istotą koncepcji jest podział elementu na n warstw poziomych, w których to warstwach zastosowano funkcje kształtu według krzywych łamanych, dopasowujących rozkład pola odkształceń do aktualnego stanu wyężenia elementu skończonego. W formie graficznej prezentowaną koncepcję pokazano na rysunku 5.

Dla tak zdefiniowanego elementu skończonego przyjęto następujące funkcje kształtu dla każdej n -tej warstwy, inne dla odkształceń liniowych i inne dla odkształceń postaciowych:

$$N_e^n = [N_i^n, N_j^n, N_k^n, N_l^n]$$

Funkcje kształtu dla odkształceń liniowych N_e

$$N_i^{ne} = \left(\frac{m_2 - m_1}{\xi_2 - \xi_1} \cdot \frac{x}{l} + \frac{m_1 \cdot \xi_2 - m_2 \cdot \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{y}{h} \right)$$

$$N_j^{ne} = \left[1 - \left(\frac{m_2 - m_1}{\xi_2 - \xi_1} \cdot \frac{x}{l} + \frac{m_1 \cdot \xi_2 - m_2 \cdot \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} \right) \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{y}{h} \right)$$

$$N_k^{ne} = \left[1 - \left(\frac{m_2 - m_1}{\xi_2 - \xi_1} \cdot \frac{x}{l} + \frac{m_1 \cdot \xi_2 - m_2 \cdot \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} \right) \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{y}{h} \right)$$

$$N_l^{ne} = \left(\frac{m_2 - m_1}{\xi_2 - \xi_1} \cdot \frac{x}{l} + \frac{m_1 \cdot \xi_2 - m_2 \cdot \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{y}{h} \right)$$

i postaciowych N_γ

$$N_i^{ny} = \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{x}{l} \right) \cdot \left(1 - \frac{y}{h} \right)$$

$$N_j^{ny} = \frac{1}{4} \cdot \left(1 + \frac{x}{l} \right) \cdot \left(1 - \frac{y}{h} \right)$$

$$N_k^{ny} = \frac{1}{4} \cdot \left(1 + \frac{x}{l} \right) \cdot \left(1 + \frac{y}{h} \right)$$

$$N_l^{ny} = \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{x}{l} \right) \cdot \left(1 + \frac{y}{h} \right)$$

(12)

Całkowanie wykonywane jest dla pojedynczej warstwy po jej wysokości, przyjmując h_d i h_g jako dolną i górną granicę całkowania. W danej warstwie należy również wykonać całkowanie w podobszarach według wzoru (3) i rysunku 3. Macierz sztywności podobszaru k w warstwie n ma zatem postać:

$$\begin{aligned} K_e^{nk} &= \oint_{V_n} B_e^{nkT} \cdot D_e^{nk} \cdot B_e^{nk} \cdot dV_n = \\ &= t_{nk} \cdot \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{h_d}^{h_g} B_e^{nkT} \cdot D_e^{nk} \cdot B_e^{nk} \cdot dy \cdot dx \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie: indeks n oznacza n -tą warstwę, natomiast indeks k oznacza k -ty podobszar całkowania warstwy n , a t_{nk} jest grubością elementu w danym podobszarze.

Ostatecznie macierz sztywności jest sumą wszystkich n warstw i k podobszarów w warstwach, według wzoru (14), w którym symbolami L_n i L_k oznaczono odpowiednio liczbę warstw i liczbę podobszarów.

$$K_e = \sum_{n=1}^{L_n} \sum_{k=1}^{L_k} K_e^{nk} \quad (14)$$

Macierz odkształceń podobszaru nk ma postać:

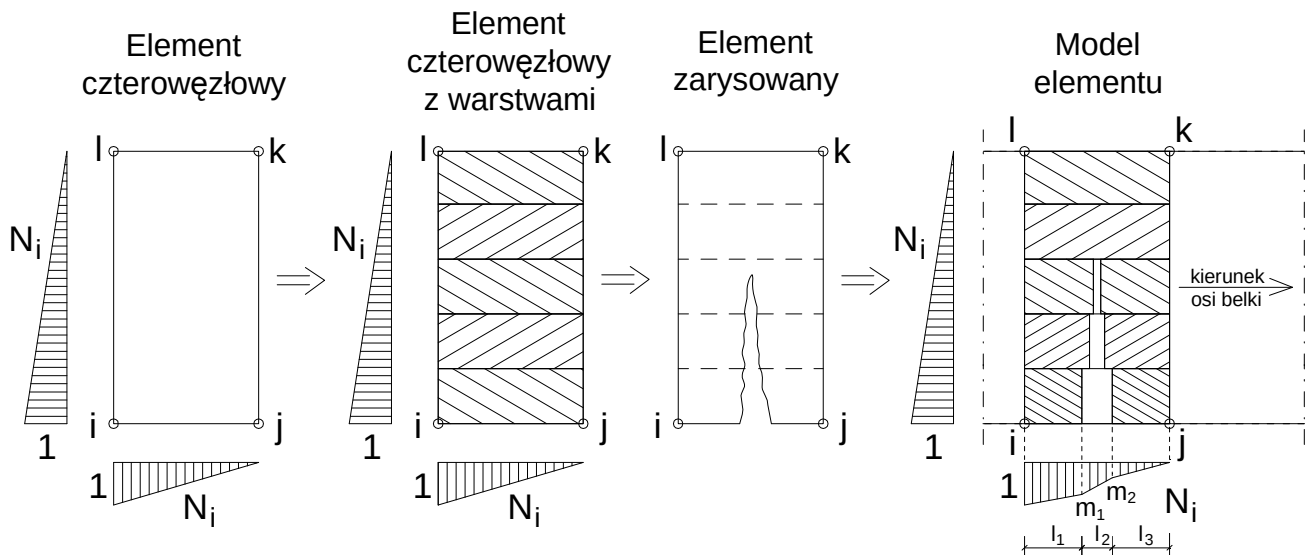
$$B_e^{nk} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} N_i^{ne} & 0 & N_j^{ne} & 0 & N_k^{ne} & 0 & N_l^{ne} & 0 \\ N_i^{ny} & 0 & N_j^{ny} & 0 & N_k^{ny} & 0 & N_l^{ny} & 0 \\ 0 & N_i^{ne} & 0 & N_j^{ne} & 0 & N_k^{ne} & 0 & N_l^{ne} \\ 0 & N_i^{ny} & 0 & N_j^{ny} & 0 & N_k^{ny} & 0 & N_l^{ny} \end{bmatrix}$$

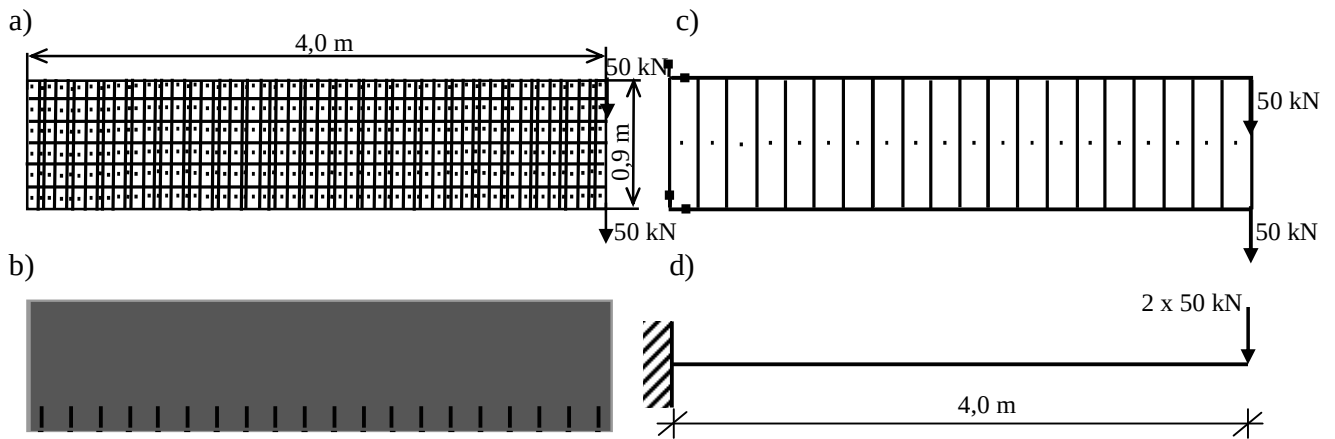
Parametry m_1 i m_2 funkcji kształtu wyznaczone są według wzorów (9), (10) i (11), przyjmując za A_k przekrój warstwy n w podobszarze k , a za l_k długość podobszaru k w warstwie n .

Zaprezentowaną metodę przetestowano na przykładzie belki wspornikowej o wysięgu 4,0 m i stałym przekroju prostokątnym 25 × 90 cm (odpowiednio grubość i wysokość przekroju). Przyjęto $E = 27,5$ GPa, $\nu = 0,2$, $G = 11,46$ GPa. Na końcu wspornika ustawiono dwie siły skupione po 50 kN każda (rys. 6d). Po długości belki w odstępach co 20 cm wykonano osłabienia przekroju – przyjęto grubość 1 cm. Osłabienia mają szerokość 4 cm i wysokość (licząc od dołu belki) 15 cm. Lokalizacje osłabień przekroju pokazano na rysunku 6b.

Dla prezentowanego przykładu wykonano obliczenia systemem ORCAN (<http://kmb.pb.edu.pl/dydaktyka/tchzyz/orcan.html>) z zastosowaniem elementów tarczowych według dyskretyzacji pokazanej na rysunku 6a, na tyle gęstej by dokładnie odwzorować osłabienia belki standardowym elementem tarczowym. Rozwiązanie posłużyło jako układ porównawczy. Następnie wykonano obliczenia z zastosowaniem prezentowanej w pracy metody według dyskretyzacji pokazanej na rysunku 6c, gdzie pojedynczym elementem odwzorowuje się duży fragment belki, włącznie ze strefą osłabienia. Dla porównania wykonano również obliczenia elementami całkowanymi w podobszarach (jak w prezentowanej metodzie) ale bez modyfikacji pola odkształceń według zaprezentowanych funkcji łamanych. Wyniki w postaci ugięcia końca wspornika zaprezentowano w tabeli 2. Jak można zauważyć z zastosowania prezentowanej metody, przy niewielkiej liczbie elementów skończonych, otrzymano wyniki zbliżone do oczekiwanych, czyli takich jakie uzyskano przy gęstej siatce podziału, według rysunku 6a, z zastosowaniem standardowych elementów płaskich.



Rys. 5. Graficzna prezentacja koncepcji elementu belkowego z zarysowaniem



Rys. 6. Model belki w teście obliczeniowym

Tab. 2. Porównanie wartości ugięcia końca testowego wspornika

Metoda	Ugięcie końca wspornika w mm	
	węzeł dolny	węzeł górny
Układ porównawczy	7,357	7,344
Elementy całkowane w podprzestrzeniach bez modyfikacji pola odkształceń	5,3193	5,318
Prezentowana metoda – elementy całkowane w podprzestrzeniach z modyfikacją pola odkształceń	7,34	7,339

4. Podsumowanie

W wyniku zastosowania prezentowanej koncepcji uzyskano wystarczająco dokładne wyniki obliczeń przy dużych zmianach sztywności. Koncepcja została

opracowana z myślą o analizie pokrytycznej konstrukcji, a zatem będącej w ruchu i doznającej dużych zmian sztywności. Analiza pokrytyczna jest tu bowiem rozumiana jako proces dynamiczny, natomiast pojęcie „dużych zmian sztywności” zawiera możliwość zmian przekrojowych, jak i liniowych w wydzielonych fragmentach elementu skończonego. Prezentowana koncepcja może być także zastosowana w stacjonarnych rozwiązaniach skokowych zmian sztywności i zagadnieniach wymagających procedur rearanżacji siatki podziału (Zienkiewicz i in., 1995).

Literatura

- Bathe K. J. (1996). *Finie Element Procedures*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York.
- Bąk G., Stolarski A. (1990). Analiza nieliniowa prętowych ustrojów żelbetowych obciążonych impulsowo. *Studia z zakresu inżynierii*, Nr 30, Warszawa.
- Chyży T. (2009). Metoda analizy budynków mieszkalnych obciążonych nadciśnieniem w strefie wewnętrznego wybuchu gazu. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej*, Białystok.

- Chyży T., Kazberuk A., Tribiło R. (1996). Zastosowanie samo adaptujących się funkcji kształtu w nieliniowej analizie obszarów płaskich i masywnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo*, z. 15/1996, 65-72.
- Zienkiewicz O. C., Pastor M., Huang M. (1995). Softening, localization and adaptive remeshing: capture of discontinuous solutions. *Computational Mechanics*, Vol. 17, No. 1-2, 98-106.
- Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. (2005). The finite element method: its basis and fundamentals. *Elsevier, Butterworth-Heinemann, Amsterdam*.

**CONCEPTION OF FINITE ELEMENTS
FOR CALCULATIONS OF CONSTRUCTIONS
WITH LARGE STIFFNESS CHANGES**

Abstract: An original conception of finite elements with adjustable shape functions, depended of local changes of stiffness in sub-areas of the calculated construction model, is presented in the paper. Presented solution is called as elements with adaptive shape functions, because described by them deformation field can be modified during the calculation process, according to local changes of stiffness. This conception can also be used for solving problems, where the local stiffness differences are the initial state. Examples of such solutions are presented in the paper. Performed computational studies show the validity of the concept and lead to correct solutions. The main advantage of the presented method is the reduction of finite elements number and the reduction of time-consuming procedures for reorganization the system geometry.

WPŁYW WIELKOŚCI OTWORÓW KONSTRUKCYJNYCH NA WYŁĘŻENIE POPRZECZNICY MOSTU SKŁADANEGO TYPU DMS-65

Artur DUCHACZEK^{a*}, Zbigniew MAŃKO^b

^a Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki, ul. Czajkowskiego 109, 51-150 Wrocław

^b Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu, ul. Sołtysowicka 19B, 51-168 Wrocław

Streszczenie: W pracy przeprowadzono analizę wytrzymałościową belki poprzecznej mostu składanego typu DMS-65 pod kątem oceny wpływu wielkości otworów konstrukcyjnych na jej wyłężenie. W analizach zastosowano metodę elementów skończonych (MES), modelując poprzecznice jako konstrukcję powłokową z zastosowaniem elementów powierzchniowych. Z przeprowadzonej analizy wynika, że istniejące otwory konstrukcyjne o średnicy 200 mm nie są optymalnym wariantem rozwiązania tej konstrukcji.

Słowa kluczowe: most składany, poprzecznic, otwór konstrukcyjny, analiza wytrzymałościowa, MES.

1. Wprowadzenie

Na terenie kraju na różnych składowiskach rezerw państwowych znajduje się wiele konstrukcji mostowych przeznaczonych do szybkiej odbudowy szlaków drogowych. Wśród nich jest między innymi drogowy most składany typu DMS-65 (rys. 1), który w dalszym ciągu znajduje się również na wyposażeniu wojska polskiego.

Zespół badawczy Rymszy (Marszałek i in., 2005) określił wojskową klasę obciążenia dla większości składanych typów konstrukcji mostowych występujących

w Polsce. Dla mostu drogowego typu DMS-65 w układzie podstawowym, w zależności od rozpiętości teoretycznej przęsła i typu obciążenia, klasa obciążenia MLC według Stanagu (STANAG, 2006) waha się między 60 a 80.

W pracy (Marszałek i in., 2005) wykazano również, że ze względu na nośność poszczególnych elementów konstrukcyjnych pomostu, dopuszczalny nacisk pojedynczej osi pojazdu kołowego wynosi 114 kN/oś dla płyty pomostowej oraz 110 kN/oś dla poprzecznic tego mostu, natomiast dopuszczalny nacisk pojazdu gąsienicowego odpowiada klasie obciążenia typu



Rys. 1. Widok na most składany typu DMS-65 podczas montażu – połączenie belki poprzecznej z dźwigarami głównymi złożonymi z kratownic przestrzennych (Mondel, 2012)

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: aduchaczek@poczta.wp.pl

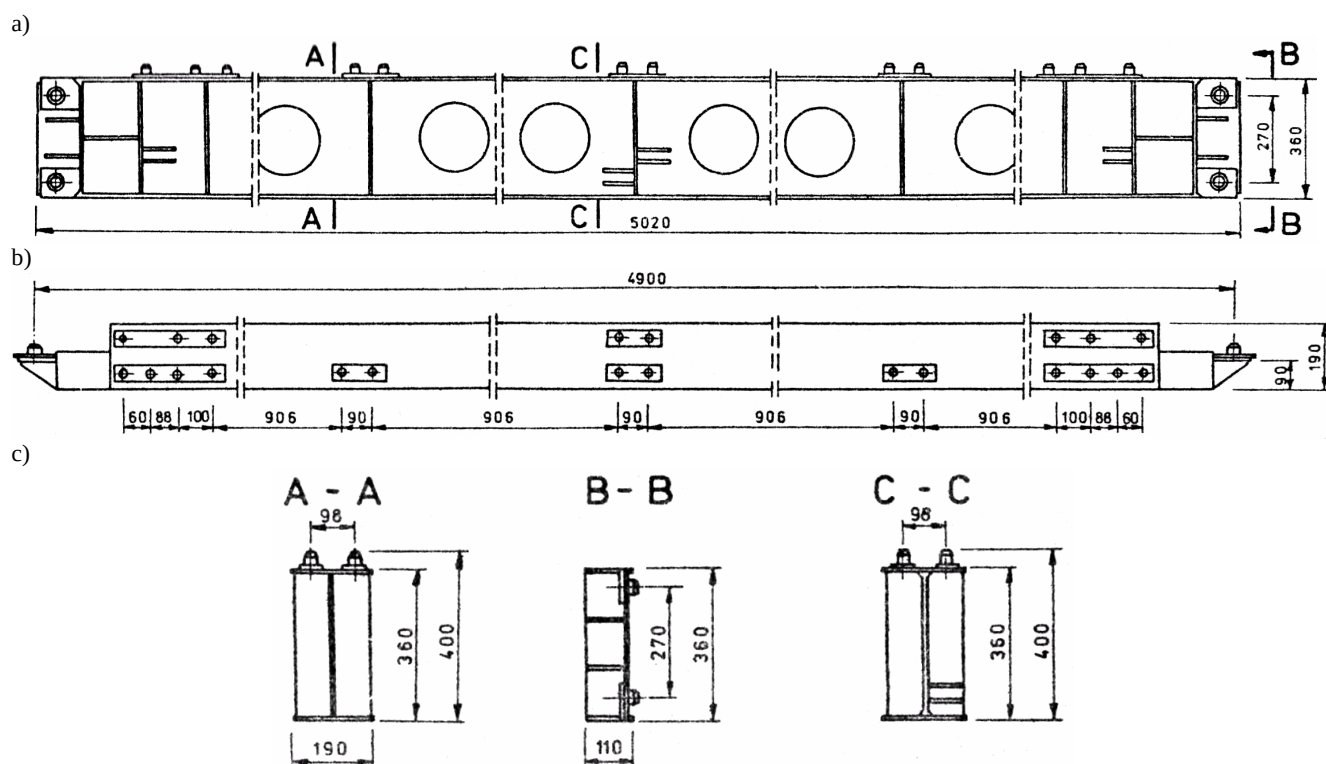
MLC 100 ze względu na nośność płyty pomostowej oraz MLC 70 ze względu na nośność poprzecznic. Stąd ostateczna nośność konstrukcji tego mostu składanego uzależniona jest przede wszystkim od nośności poszczególnych jego części składowych, a więc i poprzecznic.

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej poprzecznic (belki poprzecznej) mostu składanego DMS-65 pod kątem oceny wpływu wielkości otworów konstrukcyjnych na wyężenie tego elementu (rys. 2). Wydaje się, że ich dalsze stosowanie (przede wszystkim ze względu na zmniejszenie ciężaru konstrukcji) może okazać się niewskazane, ponieważ podczas intensywnej eksploatacji, jako tak zwane koncentratory naprężeń, mogą być podstawowym miejscem wystąpienia inicjacji pęknięć zmęczeniowych

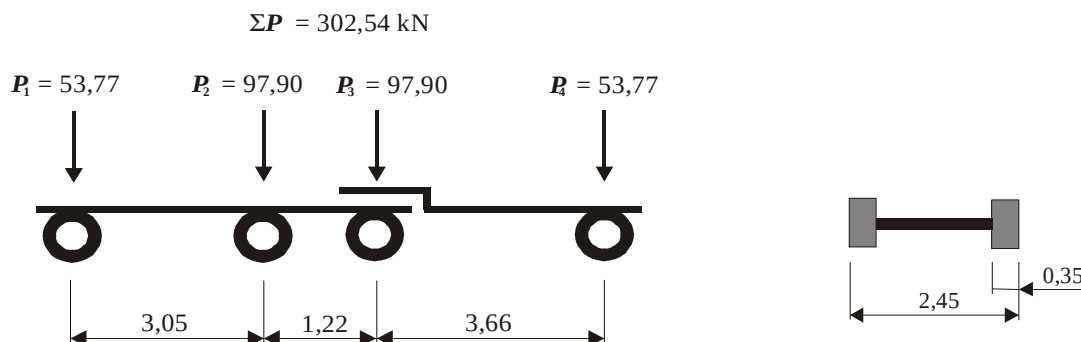
w tego typu urządzeniach i przyczyniać się bezpośrednio do powstania uszkodzeń lub awarii.

2. Założenia przyjęte do obliczeń

Biorąc pod uwagę dane materiałowe oraz parametry techniczne (Marszałek i in., 2005), przyjęto w obliczeniach i analizach obciążenie w postaci pojazdu kołowego typu MLC 30 (STANAG, 2006), co pokazano na rysunku 3. Obciążenie to mieści się w zakresie dopuszczalnego nacisku pojedynczej osi pojazdu kołowego dla poprzecznic. Wydaje się, że przyjęcie tego obciążenia w wystarczający sposób wskazuje miejsca w wysokim stopniu bezpośrednio narażone na uszkodzenia zmęczeniowe a także na przypuszczalny charakter powstania ewentualnych zniszczeń.

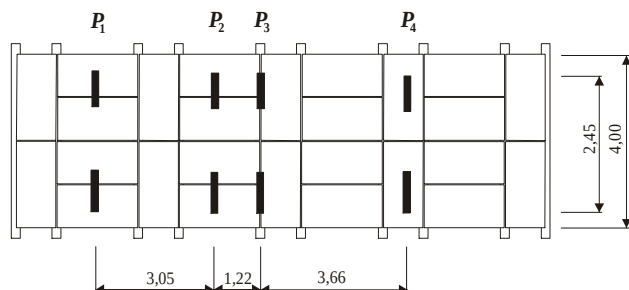


Rys. 2. Belka poprzeczna mostu składanego DMS-65 (MON, 1981), widok z: a) boku, b) góry oraz c) przekroje poprzeczne



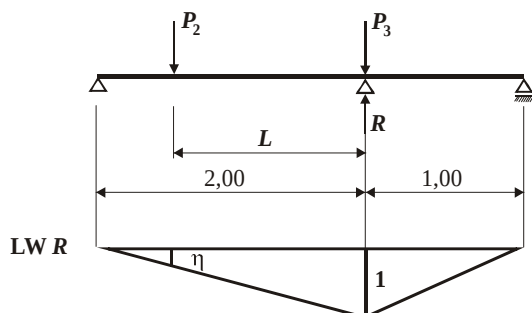
Rys. 3. Schemat obciążeń kołowych typu MLC 30 (STANAG, 2006)

Na rysunku 4 przedstawiono schemat rozmieszczenia osi pojazdu kołowego MLC 30 na długości analizowanego przęsła. Założono, że pojedyncza poprzecznicą w przyjętym schemacie obciążenia może być jednocześnie obciążona tylko czterema siłami skupionymi, to jest $2 \times P_2 + 2 \times P_3$, pochodzącymi od drugiej i trzeciej osi rozważanego typu pojazdu kołowego.

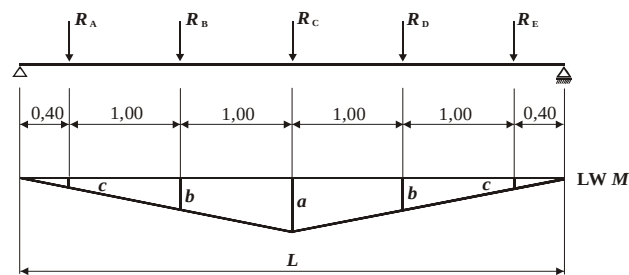


Rys. 4. Widok z góry na schemat rozmieszczenia pojazdu typu MLC 30 na długości przęsła (Duchaczek i Mańko, 2012)

Na rysunku 5 przedstawiono linię wpływu reakcji podporowej R odpowiadającej obciążeniu przekazywanemu na poprzecznice pochodzącemu z dwóch osi pojazdu kołowego typu MLC 30, natomiast na rysunku 6 odpowiednią linię wpływu momentu zginającego M w poprzecznicę od obciążenia przekazywanego przez płyty pomostu.



Rys. 5. Linia wpływu reakcji podporowej R odpowiadającej obciążeniu przekazywanemu na poprzecznice od dwóch osi pojazdu kołowego MLC 30 (Duchaczek i Mańko, 2012)

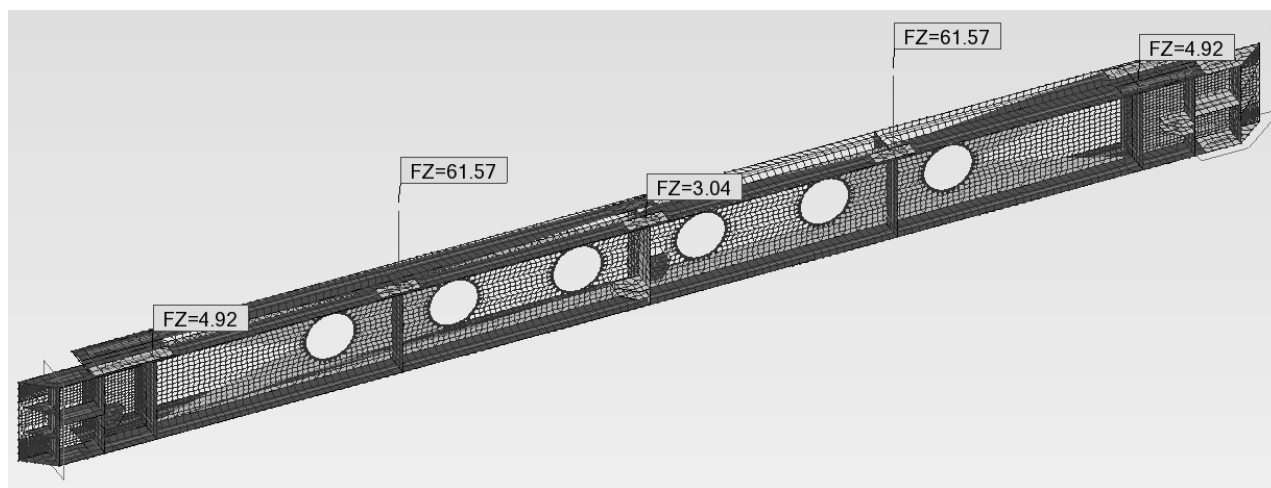


Rys. 6. Linia wpływu momentu zginającego M w poprzecznicę od obciążenia przekazywanego przez płyty pomostu (Duchaczek i Mańko, 2012)

Duchaczek i Mańko (2012) przeanalizowali dwa warianty obciążenia poprzecznic W1 (symetryczny) i W2 (niesymetryczny), pochodzące od pojazdu kołowego MLC 30 i MLC 70 przekazywane zarówno, przez dwie jak i cztery płyty pomostu. Przeprowadzone analizy wykazały, że większe naprężenia występowały w poprzecznicę obciążonej symetrycznie przy obciążeniu przekazywanym przez cztery płyty, dlatego też w niniejszej pracy do dalszych analiz przyjęty został właśnie ten schemat.

Przyjęto również założenie, że przekazywanie obciążenia z płyt pomostu na poprzecznice następuje punktowo, to jest nie w rzeczywistych miejscach występowania trzpieni znajdujących się na górnym pasie poprzecznic, a bezpośrednio nad wzmocnieniem środkowym (żebra usztywniające) (rys. 7).

Poprzecznicą w moście składanym DMS-65 połączona jest z dźwigarami głównymi, stanowiąc wraz ze słupkami i przeponami ścian dźwigarów głównych tak zwane półramę, która powoduje sprężyste utwierdzenie końców poprzecznic traktowanej tradycyjnie jako belka swobodnie podparta (Marszałek i in., 2005). Dlatego też Marszałek i in. (2005) zaproponowali, aby do obliczeń szczegółowych wartości sił wewnętrznych w tego typu konstrukcjach przyjmować schemat półramy obciążonej na wysokości pasów ściskanych siłą oporu. Uzasadnia to przyjęcie uproszczonego modelu obliczeniowego poprzecznic w postaci belki swobodnie podpartej, obciążonej dodatkowo na końcach momentem



Rys. 7. Model obliczeniowy poprzecznic przyjęty w analizach numerycznych

podporowym M_p , wywołującym w rzeczywistości odciążenie poprzecznic w połowie jej długości (Marszałek i in., 2005).

Jak wiadomo, wielkość momentu odciążającego M_p zależy od siły osiowej występującej w pasie ściskanim. W najbardziej niekorzystnym układzie dla poprzecznic, to jest bezpośrednio w pobliżu podpór skrajnych, wielkość ta jest stosunkowo niewielka (a w przypadku prześłów wjazdowych nie występuje w ogóle) i nie powinna być zawsze uwzględniana w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych poprzecznic. Przyjęcie do obliczeń schematu statycznego poprzecznic bez uwzględnienia momentu odciążającego M_p przyczynia się do określenia najbardziej niekorzystnego układu obciążenia w analizach wytrzymałościowych dla przekroju środkowego poprzecznic i tak też postąpiono w przeprowadzonych analizach.

W tabeli 1 przedstawiono wielkości sił przyjętych w obliczeniach komputerowych.

Tab. 1. Wielkości sił skupionych przyjętych w obliczeniach dla pojazdu MLC 30, w kN

Typ pojazdu	R_a	R_b	R_c	R_d	R_e	Suma
MLC 30	4,92	61,57	3,04	61,57	4,92	136,02

W analizach zastosowano metodę elementów skończonych (MES), modelując poprzecnicę jako konstrukcję powłokową (rys. 7). W procesie modelowania

wykorzystano metodę siatkowania Coons z zastosowaniem elementów powierzchniowych czworokątnych 4-węzłowych. Wymiary stworzonego modelu komputerowego przyjęto z instrukcji Drogowy Most Składany DMS-65. Budowa i eksploatacja (MON, 1981) – rysunek 2.

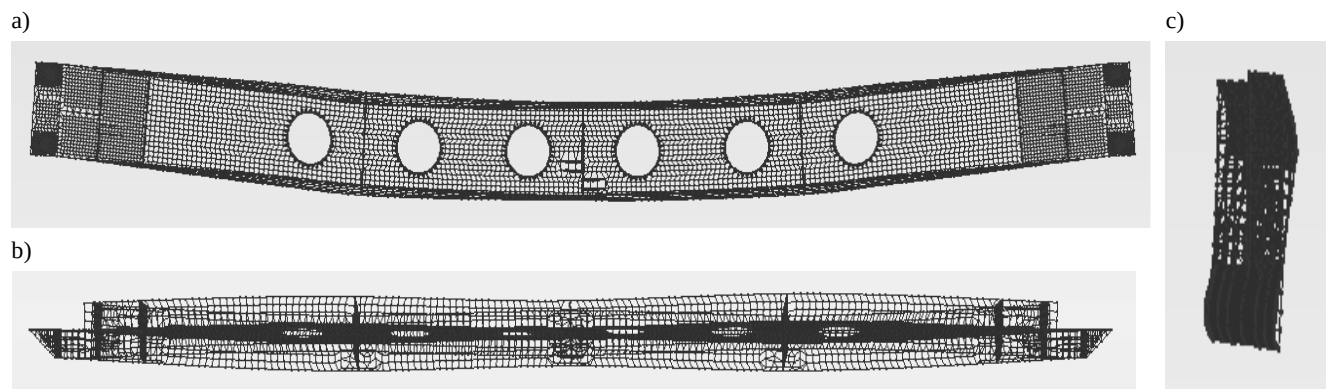
Do obliczeń przyjęto schemat obliczeniowy poprzecznic w którym założono, że jej zamocowanie do słupków kratownicy dźwigara głównego, które realizowane jest za pomocą dwóch tulei i śrub, powoduje jej częściowe utwierdzenie, to znaczy umożliwia jedynie jej ruch w kierunku podłużnym środka.

Ze względu na założony model mocowania elementu oraz po uwzględnieniu występowania wiatrownic przyjęty model numeryczny poprzecznic zachowywał się zgodnie z oczekiwaniami.

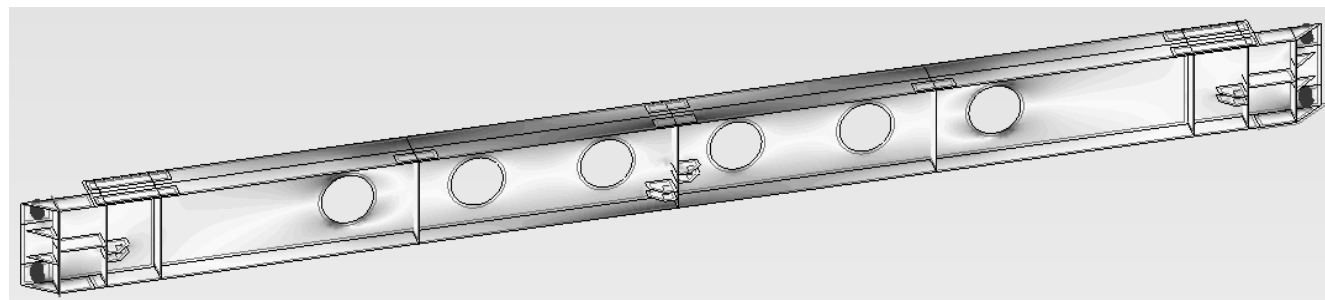
Na rysunku 8 zaprezentowano deformację analizowanej belki. Deformacja ta nie została przedstawiona w skali modelu, gdyż jej celem było pokazanie znaczących (wyolbrzymionych) odkształceń występujących w poprzecznic.

4. Wyniki analiz numerycznych

Na rysunku 9 zaprezentowano mapę rozkładów naprężeń normalnych względem osi podłużnej poprzecznic pochodzących od pojazdu kołowego według klasy MLC 30 przy uwzględnieniu rzeczywistych wymiarów otworów konstrukcyjnych, w tym przypadku o średnicy $d = 200$ mm.



Rys. 8. Deformacja analizowanej poprzecznic (wyniki nie w skali konstrukcji) w widoku z: a) przodu, b) góry i c) boku



Rys. 9. Mapa rozkładu naprężeń normalnych względem osi podłużnej poprzecznic pochodzących od obciążenia symetrycznego według klasy MLC 30

W tabelach 2 i 3 oraz na rysunkach 10 i 11 przedstawiono zestawienie wyników obliczeń naprężeń normalnych i zredukowanych w poprzecznicach dla różnych

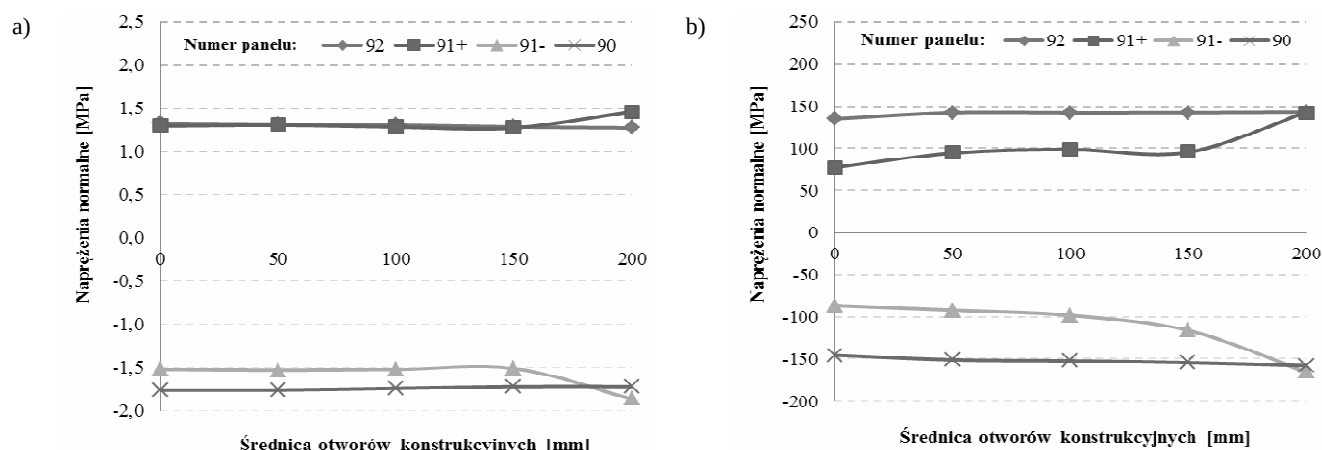
wielkości średnic otworów konstrukcyjnych od obciążenia ciężarem własnym elementu i obciążenia kołowego według klasy MLC 30.

Tab. 2. Zestawienie wyników obliczeń naprężeń normalnych w poprzecznicach dla różnych wielkości średnic otworów konstrukcyjnych od jej ciężaru własnego g i obciążenia użytkowego P według klasy MLC 30

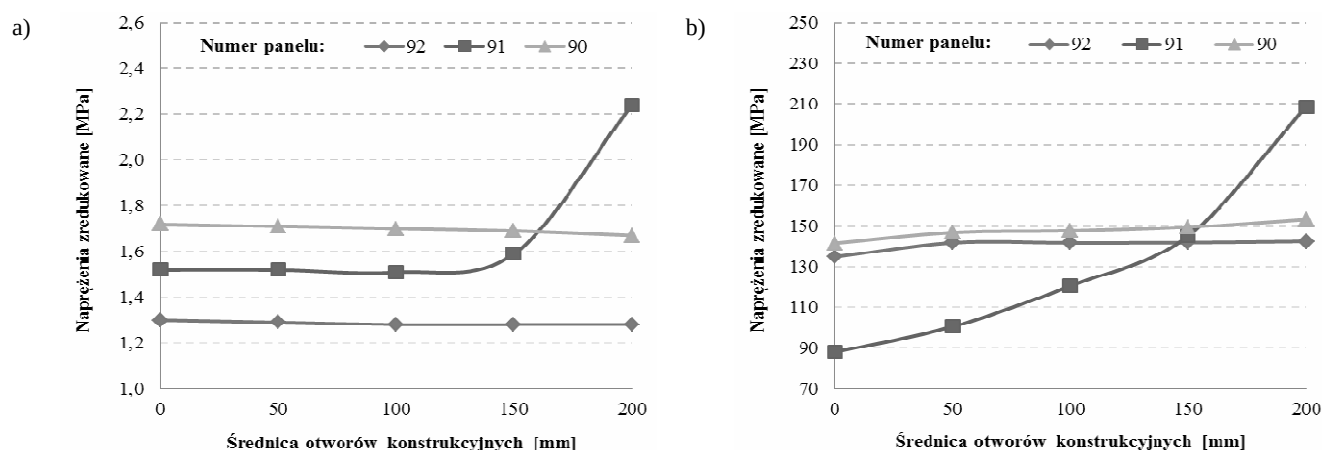
Numer panelu	Średnica otworów montażowych d [mm]									
	0		50		100		150		200	
	g	P	g	P	g	P	g	P	g	P
92 (pas dolny)	1,33	135,31	1,32	142,38	1,31	142,29	1,29	142,37	1,28	143,10
91 (środek)	1,30	77,50	1,31	94,94	1,29	99,11	1,28	95,88	1,46	143,00
	-1,52	-86,77	-1,53	-92,07	-1,52	-97,95	-1,51	-115,87	-1,86	-164,86
90 (pas górny)	-1,76	-145,40	-1,76	-150,94	-1,74	-152,02	-1,72	-154,03	-1,72	-157,50

Tab. 3. Zestawienie wyników obliczeń naprężeń zredukowanych w poprzecznicach dla różnych wielkości średnic otworów konstrukcyjnych od jej ciężaru własnego g i obciążenia użytkowego P według klasy MLC 30

Numer panelu	Średnica otworów montażowych [mm]									
	0		50		100		150		200	
	g	P	g	P	g	P	g	P	g	P
92 (pas dolny)	1,30	134,80	1,29	141,87	1,28	141,83	1,28	141,96	1,28	142,56
91 (środek)	1,52	88,03	1,52	100,46	1,51	120,58	1,59	145,24	2,24	208,85
90 (pas górny)	1,72	141,64	1,71	146,78	1,70	147,69	1,69	149,56	1,67	153,33



Rys. 10. Wyniki obliczeń naprężeń normalnych w poprzecznicach dla różnych wielkości średnic otworów konstrukcyjnych od obciążenia: a) ciężarem własnym, b) według klasy MLC 30



Rys. 11. Wyniki obliczeń naprężeń zredukowanych w poprzecznicach dla różnych wielkości średnic otworów konstrukcyjnych od obciążenia: a) ciężarem własnym, b) według klasy MLC 30

Analiza rozkładów naprężeń w badanej poprzecznicy dla otworów konstrukcyjnych o średnicy $d = 200$ mm wykazała, że największe naprężenia (normalne lub zredukowane) występują nie w pasach poprzecznicy, ale przede wszystkim w okolicy otworów konstrukcyjnych zlokalizowanych w jej środku (rys. 9).

Szczególnie jednak analiza wykresów zamieszczonych na rysunkach 10 i 11 wykazała, że zastosowanie w poprzecznicy mostu składanego DMS-65 otworów konstrukcyjnych o średnicy $d = 200$ mm nie było właściwym rozwiązaniem, gdyż wywołuje to wystąpienie w środku ekstremalnych wartości naprężeń normalnych, jak i zredukowanych.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że dla przyjętego schematu obliczeniowego poprzecznicy wariantem uniwersalnym rozwiązania pod względem konstrukcyjnym byłyby wyraźnie otwory konstrukcyjne o średnicy 150 mm.

Oprócz wysokich wartości naprężeń występujących w obszarze otworów konstrukcyjnych zlokalizowanych w środku poprzecznicy, zaobserwowano także stosunkowo wysokie ich wartości w obrębie tulejek mocujących, co wynikało jednak tylko i wyłącznie ze sposobu modelowania tego połączenia.

5. Wnioski końcowe

Skrajne otwory konstrukcyjne występujące w środku poprzecznicy mostu są znaczącymi koncentratorami naprężeń, a przez to w przyszłości podczas ich wieloletniej eksploatacji mogą stać się głównym miejscem inicjacji pęknięć zmęczeniowych. Wydaje się, że korzyść wynikająca ze zmniejszenia ciężaru tych elementów jest nieadekwatna w porównaniu do ewentualnego zmniejszenia trwałości tego elementu konstrukcyjnego, a tym samym całego mostu, tym bardziej, że masa sześciu otworów konstrukcyjnych występujących w poprzecznicy to około 11 kg, co przy masie pełnego elementu (około

290 kg) stanowi zaledwie 3,79% jego masy (Duchaczek i Mańko, 2012).

Przeprowadzone obliczenia i analizy wytrzymałościowe poprzecznicy powinny zostać uwzględnione podczas dalszych rozważań nad ewentualną modernizacją tego elementu konstrukcyjnego.

Literatura

- Duchaczek A., Mańko Z. (2012). Analiza wytrzymałościowa poprzecznicy mostu składanego typu DMS-65. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki*, Wrocław, 2/2012, 268-281.
- Marszałek J., Jarzyna R., Bryda P., Chmielewski R., Jakubowski G., Marcinkowski R., Rymsza J. (2005). Mosty składane. Projektowanie, budowa i eksploatacja. *Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad*, Warszawa.
- MON (1981). Drogowy Most Składany DMS-65. Budowa i eksploatacja. *Ministerstwo Obrony Narodowej*, Główny Kwatermistrzostwo WP, Szef. Kom. 135/79, Warszawa.
- Mondel A. (2012). Technologia i organizacja montażu (demontażu) konstrukcji przeszłowej DMS-65. Materiały dydaktyczne (prezentacja multimedialna PowerPoint) udostępniona 2.05.2012 r.
- STANAG (2006). *Stanag 2021. Military Load Classification of Bridges*. Edition no. 6. 7 September 2006.

IMPACT OF SIZE OF ASSEMBLY HOLES ON EFFORT OF DMS-65 TYPE ASSEMBLED BRIDGE TRANSOM

Abstract: The author of the paper conducted a strength analysis of a cross-beam in a DMS-65 type assembled bridge with regard to the assessment of the impact of the size of assembly holes on its effort. In the analyses the finite element method (FEM) was employed, modelling the transom as a monocoque construction with the use of surface elements. It transpires from the conducted analysis that the existing assembly holes of 200 mm in diameter are not an optimum solution of that construction.

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA RÓŻNYCH ŹRÓDEŁ CIEPŁA DLA BUDYNKU OŚRODKA KULTURY I SPORTU

Dorota KRAWCZYK*, Urszula ŻYŁKIEWICZ

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

Streszczenie: W artykule przedstawiono porównanie trzech źródeł ciepła dla budynku użyteczności publicznej. Przeprowadzono analizę ekonomiczną, obejmującą oszacowanie i porównanie nakładów inwestycyjnych oraz kosztów eksploatacyjnych wybranych rozwiązań, a także oceniono je pod względem możliwości technicznych, zastosowania i ekologicznego, związanym z emisją zanieczyszczeń do środowiska.

Słowa kluczowe: kotłownie, zużycie paliwa, nakłady inwestycyjne.

1. Wprowadzenie

Obecnie coraz większe znaczenia ma fakt wyboru odpowiedniego źródła ciepła dla ogrzewanych obiektów.

Zasoby paliw konwencjonalnych zmniejszają się, a zapotrzebowanie na energię rośnie, czego przyczyną można upatrywać we wzroście tempa rozwoju gospodarczego wielu krajów, czy też zwiększeniu się liczby ludności. Zużycie energii do celów ogrzewania, podgrzewu ciepłej wody, oświetlenia, chłodzenia i pracy urządzeń elektrycznych w sektorze budowlanym stanowi około 40 % całkowitej ilości energii pierwotnej w Polsce, a jedną trzecią w krajach EU-30 (Ziębik i in., 2005). Ograniczanie zużycia energii realizowane jest poprzez stosowanie przegród zewnętrznych o coraz niższych współczynnikach przenikania ciepła, podwyższanie sprawności instalacji wewnętrznych – na etapie produkcji, dystrybucji i wykorzystania energii. W przypadku wytwarzania energii do celów¹⁾ grzewczych duże znaczenie odgrywa decyzja inwestora o wyborze źródła ciepła.

W artykule przedstawiono wyniki analizy przeprowadzonej dla budynku Domu Kultury i Sportu położonego w województwie podlaskim.

2. Możliwości techniczne zastosowania różnych paliw w ogrzewnictwie

2.1. Paliwa stałe

Paliwa stałe są dostępne w postaci: drewna, torfu, węgla kamiennego, węgla brunatnego, brykietów, koksu i półkoksu (Foit, 2010). W przypadku węgla kamiennego znanych jest wiele jego odmian, o różnej granulacji: kostka (od 80 do 120 mm), orzech (od 40 do 80 mm), groszek (od 20 do 40 mm), groszek EKO (od 8 do 25 mm) oraz miał i flotokoncentrat.

Brykiety wytwarzane są z rozdrobnionego i wysuszonego węgla kamiennego lub brunatnego w procesie prasowania w brykietniach, w którym uzyskuje się produkt, którego spalanie prowadzi do 2-3 krotnego obniżenia emisji CO₂, SO₂ i pyłów (www.brykiet-weglowy.pl). Z kolei koks powstaje w wyniku procesu suchej destylacji węgla, polegającym na oddzieleniu części lotnych, przy ogrzewaniu bez dostępu do powietrza w temperaturze 600-1200°C. Półkoks uzyskuje się w procesie wylewania węgla kamiennego lub brunatnego w temperaturze około 500°C (Foit, 2010; www.paliwa-kopalne.pl). Najstarszym stosowanym paliwem jest drewno. W wysokich temperaturach, przy jego podgrzewaniu, wydzielają się gazy głównie zawierające węgiel, tlen i wodór. Spalane jest w różnych postaciach takich jak trociny, pelety, brykiety z pyłów drzewnych lub odpady (Pieńkowski i in., 1999). Produktem powstałym podczas prasowania biomasy (trociny drzew liściastych) są pellety – w kształcie walca o średnicy od 6 do 8 mm i długości

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: d.krawczyk@pb.edu.pl

od 10 do 30 mm (www.arnomeko.pl). Zaletami pelletów jest duża gęstość, niska zawartość CO₂ w spalinach i stosunkowo niska cena, natomiast nie jest to jeszcze produkt łatwo dostępny w odpowiednio dużych ilościach we wszystkich miejscowościach w kraju.

Najważniejszym parametrem, warunkującym przydatność danego paliwa do celów energetycznych jest jego wartość opałowa, podawana w kJ/kg. Należy jednak pamiętać, iż w przypadku wielu rodzajów paliw ich przydatność warunkuje jeszcze wilgotność, która w stanie pozyskanym jest wysoka i wynosi nawet 60%.

Wartość opałową paliw stałych oblicza się zgodnie z zależnością (Foit, 2010):

$$Q_1 = 339,1C + 1214,2\left(H - \frac{O}{8}\right) + 104,7S - 25,12W_c \quad [kJ/kg] \quad (1)$$

gdzie: C , H , O , S , W_c są odpowiednio udziałami masowymi poszczególnych składników paliwa, to znaczy węgla, wodoru, tlenu, siarki i wody.

Wartości opałowe podstawowych paliw stałych zestawiono w tabeli 1 (Pieńkowski i in., 1999, www.biomasa.org.pl, www.globenergia.pl, www.brykietweglowy.pl).

Tab. 1. Wartości opałowe podstawowych paliw stałych

Lp.	Nazwa paliwa	Wartość opałowa w kJ/kg
1	Węgiel kamienny	21 000-31 000
2	Brykiet węglowy	28 700
3	Węgiel brunatny	20 000
4	Drewno kawałki	11 000-22 000
5	Koks	25 000-29 000
6	Eko groszek	25 000-26 000
7	Zrębki	6 000-16 000
8	Torf	11 000-15 000
9	Pelety	16 500-17 500
10	Słoma	14 300-15 200

Oczywiście wartość opałowa nie jest jedynym czynnikiem warunkującym zastosowanie danego paliwa. Poszczególne rodzaje paliw stałych różnią się między sobą ceną, dostępnością, co ma wpływ na stronę ekonomiczną. Ponadto cechuje je różna emisją zanieczyszczeń do atmosfery podczas procesu spalania, dlatego część paliw jest promowana ze względów ekologicznych.

2.2. Paliwa ciekłe

W skład paliw płynnych wchodzi: oleje mineralne, oleje smołowe i oleje syntetyczne. W wyniku destylacji ropy naftowej, będącej mieszaniną różnorodnych związków chemicznych, powstają oleje lekkie, średnie i ciężkie. Podstawowe znaczenie ma otrzymywany tą drogą olej opałowy lekki, przeznaczony do spalania w kotłach. Oleje smołowe to produkty destylacji smół, a oleje syntetyczne

są wytwarzane z węgla i pozostałości ropy naftowej. (Pieńkowski i in., 1999). Podczas spalania oleju powstają głównie zanieczyszczenia gazowe, takie jak tlenki azotu, dwutlenek węgla, dwutlenek siarki oraz niespalone węglowodory (Kordylewski, 1999).

Ciepło spalania i wartość opałowa są uzależnione od zawartości wodoru w paliwie. Im więcej wodoru, tym większa jest wartość opałowa. W przypadku olejów mineralnych stosunek wodoru do paliwa zawiera się w granicach: 0,115-0,165, zatem wahania wartości opałowej są nieznaczne (Żyłkiewicz, 2012).

2.3. Paliwa gazowe

Paliwa gazowe mają szerokie zastosowanie w ciepłownictwie, gdyż zapewniają praktycznie bezobsługową możliwość zasilania obiektu w paliwo, łatwość pełnej automatyzacji procesu spalania oraz dobre parametry ekologiczne. Paliwa gazowe lżejsze od powietrza stosowane w gospodarce komunalnej są rozprowadzane za pośrednictwem sieci gazowej. Podzielono je na grupy, w zależności od sposobu ich pozyskiwania i nominalnej wartości liczby Wobbiego. Gazy sztuczne mogą być wytwarzane poprzez przetwarzanie paliw stałych i ciekłych oraz ich mieszaniny z gazami ziemnymi i propano-butanowymi. Gaz ziemny pochodzenia naturalnego, którego składnikiem jest głównie metan możemy podzielić na podgrupy: gazy wysokometanowe E, zaazotowane Lw, Ls, Ln i Lm. Ciepło spalania poszczególnych rodzajów gazu podano w tabeli 2.

Tab. 2. Właściwości niektórych paliw gazowych (www.gazyfikacja.com, www.orlengaz.pl)

Rodzaj gazu	Ciepło spalania w MJ/m ³
Gaz wysokometanowy typu E	39,5
Gaz zaazotowany Ls	28,8
Gaz zaazotowany Lw	32,8
Propan	99,2
Butan	133,2

3. Możliwości zastosowania różnych paliw w rozpatrywanym obiekcie.

Rozpatrywany budynek znajduje się w IV strefie klimatycznej. Składa się z trzech kondygnacji nadziemnych i piwnicy, gdzie zlokalizowana jest kotłownia. W kotłowni będzie wytwarzany czynnik grzewczy na potrzeby c.o. o parametrach pracy 80/60°C. Projektowane źródła ciepła pokrywają całkowite zapotrzebowanie na moc cieplną na cele c.o., wynoszące 58 kW. Do obliczeń projektowych straty ciepła przyjęto podane współczynniki przenikania ciepła przez przegrody budowlane wynoszące 0,3 W/m²K przy ścianach zewnętrznych, 1,9 W/m²K przy ścianach wewnętrznych, 1,7 W/m²K dla okien. Całkowite zapotrzebowanie

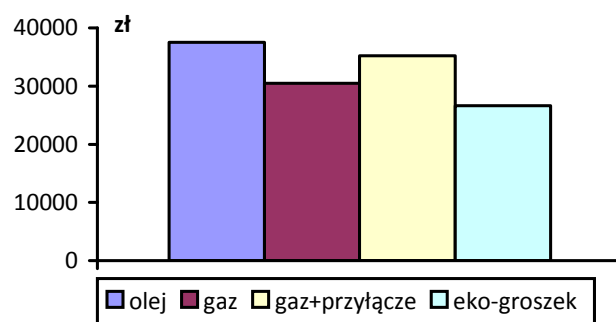
na ciepło pomieszczeń określono zgodnie z PN-EN 12831 *Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego*, a moc cieplna, którą musi zapewnić źródło ciepła wyniosła 57,6 kW.

W każdym z trzech wariantów ciepła woda użytkowa będzie przygotowywana za pomocą podgrzewaczy elektrycznych, dlatego koszty związane z eksploatacją nie wchodzą w zakres niniejszej analizy. We wszystkich przypadkach instalacje wewnątrz kotłowni będą wykonane z rur stalowych czarnych, łączonych poprzez spawanie, zgodnie z *Warunkami technicznymi wykonania i odbioru robót budowlano-montażowych* (1998) oraz *Warunkami technicznymi wykonania i odbioru instalacji ogrzewczych* (Płuciennik, 2006).

W pierwszym wariantcie źródłem ciepła będzie olejowy kocioł typu GT 225, o mocy 64 kW, wyposażony w nadmuchiwy, olejowy palnik typu M 201/2S, firmy De Dietrich. Regulacja pogodowa kotła będzie odbywać się we współpracy z czujnikiem zewnętrznym i termostatem pokojowym. Instalacja będzie pracowała w układzie zamkniętym z przeponowym naczyniem wzbiorczym typu NG 25 o pojemności 25 l, firmy Reflex. Odprowadzanie spalin odbywać się będzie do komina ze stali kwasoodpornej o średnicy 180 mm. Olej magazynowany będzie w pomieszczeniu obok kotłowni. Przewidziano, że zbiorniki typu 1003 E, firmy Werit należy napełniać co 60 dni.

W drugim wariantcie na cele grzewcze będzie pracował gazowy atmosferyczny kocioł typu DTG 230 S firmy De Dietrich. Automatyka kotła, układ instalacji oraz odprowadzanie spalin pozostaje bez zmian, jak w wariantcie pierwszym, natomiast brak jest urządzeń do gromadzenia i transportu oleju.

W trzecim wariantcie zaproponowano kocioł na Eko-groszek typu Viadrus Ling 75 z podajnikiem, firmy Klimosz. Praca kotła sterowana będzie również za pomocą czujnika zewnętrznego oraz termostatu pokojowego. Instalacja będzie pracowała w systemie otwartym z naczyniem wzbiorczym otwartym typu A/21 o pojemności użytkowej 25 l, umieszczonym pod stropem ostatniej kondygnacji. Rury bezpieczeństwa, wznosna, przelewowa, odpowietrzająca oraz sygnalizacyjna będą wykonane z rur stalowych. Odprowadzanie spalin będzie odbywać się do komina z cegły pełnej o przekroju 200 × 250 mm. Dla każdego z wariantów określono nakłady inwestycyjne oraz koszty eksploatacyjne. W przypadku nakładów ponoszonych na wykonanie kotłowni (rys. 1) najtańsza okazała się kotłownia na paliwo stałe, choć koszt kotłowni gazowej był wyższy jedynie o 14% i w przypadku zastosowania urządzeń innych firm mógłby być zbliżony do wariantu 3. W tym przypadku nie uwzględniano faktu, że w przypadku gazu konieczne mogłoby się okazać wykonanie przyłącza gazowego. Taki przypadek rozpatrzono dodatkowo. Jak widać nakłady w wariantcie drugim uległy zwiększeniu i były tylko nieco niższe, niż w przypadku kotłowni olejowej.



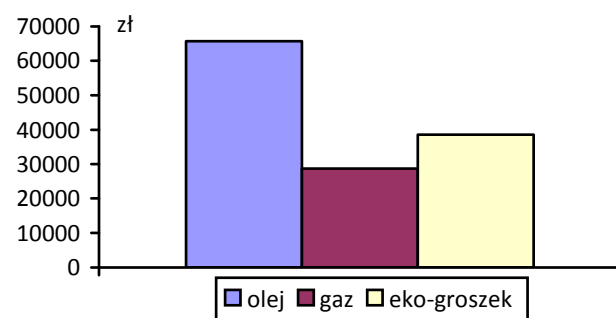
Rys. 1. Zestawienie nakładów inwestycyjnych (Żyłkiewicz, 2012)

Koszty eksploatacyjne policzono przy założeniu, że sezon grzewczy trwa 232 dni. W pierwszym wariantcie cenę oleju przyjęto na poziomie 3,30 zł/l, co przy zużyciu 15.490 l/sezon dało 51.117 zł. Dodatkowo przyjęto koszt konserwacji kotłowni w kwocie 200 zł/miesiąc. W przypadku wariantu drugiego zużycie gazu wyniosło 57 m³/dobę. Cenę gazu przyjęto według taryfy W-4 Mazowieckiej Spółki Gazowniczej (tab. 3). Koszt konserwacji kotłowni w kwocie 200 zł/miesiąc.

Tab. 3. Stawki opłat za usługi dystrybucji Mazowieckiej Spółki Gazowniczej

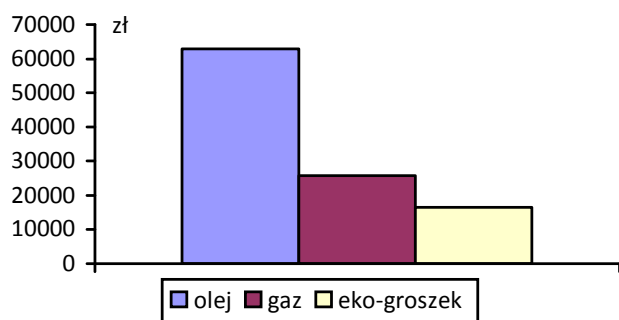
Opłata		
abonamentowa	stała	zmienna
zł/m-c	zł/m-c	zł/m ³
12,18	116	0,2657 + 1,17

Przy Eko-groszku wyliczone zużycie wyniosło 23.645 kg/sezon, a przyjęto cena 565,8 zł/t. Koszty obsługi przyjęto równe 18.000,00 zł/rocznie. Porównanie kosztów eksploatacji pokazano na rysunku 2.



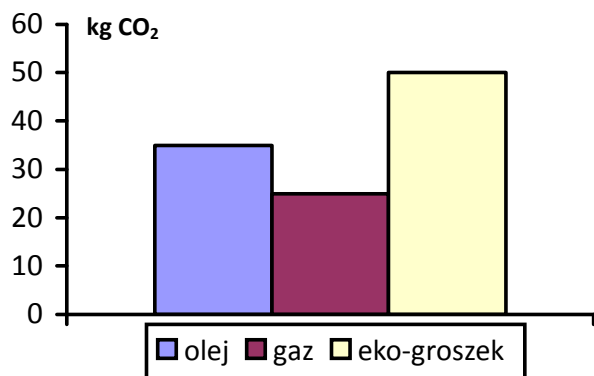
Rys. 2. Zestawienie kosztów eksploatacyjnych (Żyłkiewicz, 2012)

Wykres sezonowych kosztów eksploatacyjnych (rys. 2) pokazuje, iż zdecydowanie największe koszty wystąpiły podczas ogrzewania olejem opałowym lekkim, natomiast opłaty za gaz ziemny są najniższe. Koszty dla eko-groszku są pośrednie, natomiast duży wpływ na ten fakt ma koszt obsługi. Gdyby nie była ona wymagana koszty przedstawiałyby się tak, jak na rysunku 3.

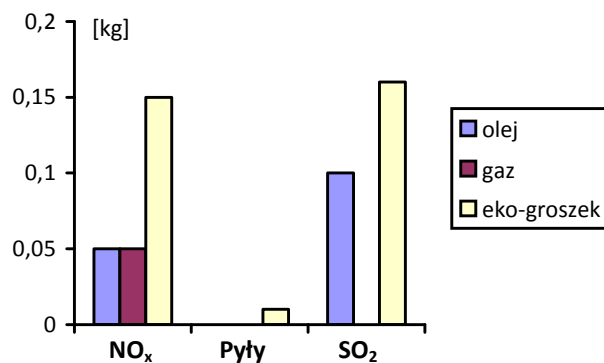


Rys. 3. Zestawienie kosztów eksploatacyjnych bez uwzględnienia obsługi (Żyłkiewicz, 2012)

Wykres ten pokazuje, iż najtańszym rozwiązaniem byłoby trzecie z możliwych. Takie wnioski można wysunąć przy analizie sposobów ogrzewania budynków jednorodzinnych, natomiast w rozpatrywanym przypadku zważając na to, iż jest to budynek usługowy, musi być zapewnienia stała kontrola, a zatem obsługa jest konieczna. Analizując powyższe wykresy, można stwierdzić, iż najmniej nakładów pieniężnych jest potrzebnych na budowę kotłowni na paliwo stałe, jednak przy eksploatacji zajmuje ona drugie miejsce. Jedyne w przypadku gazu ziemnego potrzeby finansowe na użytkowanie nie przewyższają nakładów. Natomiast koszt wykonania jest różny w zależności od wybranej opcji, ale nie wpływa znacząco w stosunku do innych rozwiązań. W wariantcie pierwszym zarówno nakłady inwestycyjne, jak i koszty eksploatacyjne są najwyższe spośród wybranych rozwiązań. Z powyższych danych wynika, iż najdogodniejszym rozwiązaniem jest kotłownia gazowa. Atutem tego rozwiązania jest wolne pomieszczenie, które nie jest potrzebne do magazynowania paliwa. W kotłowni na paliwo stałe istnieje konieczność wydzielania składu opału i żużli, a w olejowej magazynu oleju. Proponowane rozwiązania porównano także pod względem ekologicznym. Na podstawie jednostkowych wskaźników (www.kape.gov.pl) oszacowano ilości zanieczyszczeń, jakie powstałyby przy spalaniu poszczególnych paliw w ciągu sezonu grzewczego. Na rysunku 4 pokazano emisję dwutlenku węgla, natomiast na rysunku 5 tlenków azotu, pyłów i dwutlenku siarki dla poszczególnych paliw. Najlepsze parametry ekologiczne posiada gaz ziemny.



Rys. 4. Emisja dwutlenku węgla



Rys. 5. Emisja tlenków azotu, pyłów i dwutlenku siarki

4. Podsumowanie i wnioski

Analiza porównawcza wykazała, że pod względem inwestycyjnym najtańsza jest kotłownia na Eko-groszek, natomiast najdroższa na olej opałowy lekki. Kotłownia gazowa plasuje się pomiędzy nimi, jednak na jej koszt duży wpływ może mieć konieczność wykonania przyłącza gazowego – w przypadku jego istnienia koszt jest zbliżony do kotłowni węglowej, natomiast jego brak może prowadzić do zwiększenia nakładów do poziomu kotłowni olejowej, a nawet ich przewyższenia. W przypadku kosztów eksploatacyjnych bez uwzględniania obsługi i konserwacji najtańszy jest wariant z kotłownią węglową, jednak po ich uwzględnieniu – co musi mieć miejsce we wszystkich obiektach z wyjątkiem domów jednorodzinnych, najbardziej opłacalny cenowo okazuje się wariant z kotłownią gazową. W obu przypadkach, zarówno przy uwzględnianiu kosztów obsługi i konserwacji, jak i bez nich, najdroższa w eksploatacji okazała się kotłownia olejowa. Pod względem ekologicznym najlepsza jest kotłownia opalana gazem ziemnym. Poza aspektem ekonomicznym i ekologicznym należy rozważyć warunki techniczne i użytkowe. Należy do nich dostępność paliw, możliwość przyłączenia do sieci gazowej, parametry sieci (na przykład konieczność wykonania dodatkowej stacji redukcyjnej), wielkość pomieszczenia kotłowni (przy węglu i oleju – konieczność wygospodarowania dodatkowych pomieszczeń na paliwo, które w wariantcie z kotłem na gaz ziemny można przeznaczyć na inne cele).

Literatura

- Foit H. (2010). Indywidualne, konwencjonalne źródła ciepła. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Kordylewski W. (1999). Spalanie i paliwa. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Pieńkowski K., Krawczyk D., Tumel W. (1999). Ogrzewnictwo. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok.
- Pluciennik M. (2006). Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Instalacji Ogrzewczych. COBRTI INSTAL, Warszawa.
- Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Robót Budowlano – Montażowych. Tom 2. Instalacje sanitarne i przemysłowe. St. Poniatowski (red.), Arkady, Warszawa.

- Wykorzystanie paliw stałych w ogrzewnictwie. Poradnik.
www.bape.com.pl/Portals/0/Poradnik.pdf
- Ziębik A., Hoinka K., Kolokotroni M. (2005). System approach to the energy analysis of complex buildings. *Energy and Buildings*, Vol.37, 930-938.
- Żyłkiewicz U. (2012). Analiza techniczno-ekonomiczna wyboru źródła ciepła dla budynku Ośrodka Kultury i Sportu w Ciechanowcu. Praca dyplomowa, *Politechnika Białostocka*.

**THE ANALYSIS OF DIFFERENT
ENERGY SOURCES FOR THE BUILDING
OF CULTURE AND SPORT CENTRE**

Abstract: The article presents the comparison of three heat sources working for the public building. An economic analysis, including estimation and comparison of investment and operating costs for selected solutions was done. Moreover technical feasibility and environmental problems were discussed.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji prac statutowych Politechniki Białostockiej S/WBIŚ/5/2011.

OCENA ZAWARTOŚCI AKTYWNEGO SiO_2 W POPIOŁACH LOTNYCH WYTWARZANYCH W OBIEKTACH ENERGETYCZNYCH PÓŁNOCNO-WSCHODNIEJ POLSKI

Małgorzata LELUSZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-352 Białystok

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań terenowo-laboratoryjnych wahań ilości reaktywnego SiO_2 w popiołach lotnych z obiektów energetycznych północno-wschodniej Polski. Ocenę ilości SiO_2 wykonano w zależności od dwóch czynników: źródła pochodzenia popiołu lotnego (czynnik A) i okresu odbioru próbek popiołu (czynnik B). Zastosowanie analizy wariancji do oceny zgromadzonych danych pozwoliło ustalić, że oba rozpatrywane czynniki A i B istotnie wpływają na zawartość SiO_2 w popiołach lotnych uzyskanych w ciągu siedmiu miesięcy sezonu grzewczego 2010/2011 z wytypowanych sześciu obiektów energetycznych. Udział wpływu czynnika A wynosi 64%, zaś czynnika B – 7%, to jest czynnik B ma znacznie mniejszy wpływ niż czynnik A.

Słowa kluczowe: obiekt energetyczny, popiół lotny, reaktywna krzemionka, sezon grzewczy, analiza wariancji, czynnik istotny.

1. Wprowadzenie

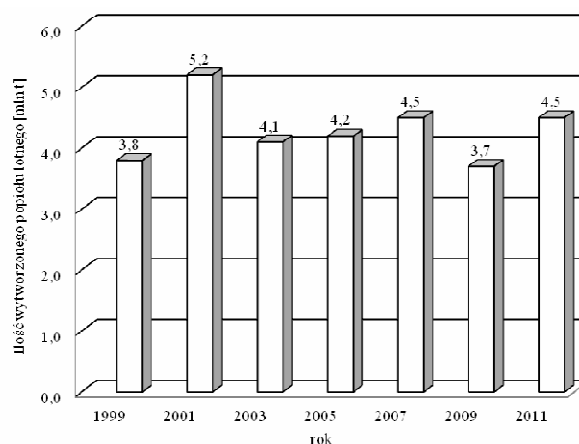
Popioły lotne od lat są powszechnie stosowane jako dodatki do cementu i betonu. Są to pyły wytrącane w elektrofiltrach po spalaniu węgla kamiennego lub brunatnego w różnego rodzaju paleniskach obiektów energetycznych. Popiół lotny dodawany do mieszanki betonowej w znacznym stopniu wpływa na właściwości betonu. Uzyskane tworzywo może wykazywać zwiększoną trwałość konstrukcji w wyniku zmniejszenia ciepła hydratacji spoiwa, obniżenia alkaliczności cementów, wzrostu odporności betonu na wnikanie chlorków i siarczanów.

Stosowanie popiołów lotnych jako dodatków do betonu ma również znaczenie ekologiczne.

Umożliwia bezpieczne zagospodarowanie uciążliwego odpadu. Produkty hydratacji cementu portlandzkiego mogą trwale wiązać toksyczne kationy występujące w popiołach lotnych. Stopień immobilizacji metali ciężkich przez spoiwa mineralne może wynosić powyżej 99% (Nocuń-Wczelik, 1997).

Przemysł energetyczny w Polsce, który opiera się głównie na spalaniu węgla, generuje każdego roku miliony ton ubocznych produktów spalania. Popioły lotne stanowią prawie 70% wytwarzanych odpadów energetycznych. Na rysunku 1 przedstawiono ilości wytworzonych popiołów lotnych w Polsce. Popioły lotne

z węgla wytwarzane są w naszym kraju na zbliżonym poziomie od kilkunastu lat (GUS, 2000-2012).



Rys. 1. Popioły z węgla wytwarzane w Polsce w ciągu roku (opracowanie własne na podstawie GUS, 2000-2012)

Obecnie istnieje wiele możliwości zagospodarowywania popiołów lotnych. Są one stosowane do produkcji klinkieru i cementu, do produkcji betonu oraz produkcji kruszyw lekkich i ceramiki budowlanej, jak również w drogownictwie i robotach inżynierskich oraz w górnictwie podziemnym (Hycnar 2009; Galos

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

i Uliasz-Bocheńczyk 2005). Wykorzystanie popiołów lotnych jest wysokie i utrzymuje się w ostatnich latach na poziomie około 90% (GUS, 2000-2012).

Klasyfikację oraz ocenę jakości popiołów lotnych można przeprowadzić ze względu na różne kryteria: skład chemiczny, zawartość substancji amorficznej i krystalicznych składników mineralnych, uziarnienie (miałkość) czy zawartość niespalonego węgla (straty prażenia). Skład chemiczny popiołów lotnych zależy od rodzaju spalonego węgla, a przede wszystkim od składu mineralnego substancji towarzyszących. Można wyodrębnić cztery grupy składników popiołów lotnych (Bastian, 1980):

- składniki podstawowe (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO),
- składniki uboczne (MgO , SO_3 , NaO , K_2O),
- składniki śladowe (TiO_2 , P_2O_5 , MnO i inne),
- niespalony węgiel (straty prażenia).

Popioły lotne uzyskane w wyniku spalania węgla kamiennego stosuje się w produkcji cementu i betonu, ponieważ mają one dużą miałkość i skład zbliżony do ilastych surowców naturalnych. Ich skład chemiczny jest podobny do składu wyprażonego łupku karbońskiego, który jest głównym niepalnym składnikiem węgla kamiennego. Jest to powodem niedużych różnic chemicznych tej grupy popiołów lotnych (Giergiczny, 2006). Kurdowski (2010) podaje, że popioły z węgla kamiennego charakteryzują się stosunkowo nieznacznymi różnicami składu chemicznego, ilość aktywnego SiO_2 stanowi przeciętnie 46-50%. Natomiast Giergiczny (2006) podaje, że zawartość krzemionki może się wahać od 23 do 70%, czyli wahania składu chemicznego popiołów mogą być znaczne.

Oceniając popioły jako aktywne dodatki mineralne do cementu czy betonu należy wziąć pod uwagę nie tylko ich skład chemiczny, lecz przede wszystkim udział w nim aktywnej substancji bezpostaciowej. O właściwościach pucolanowych popiołów lotnych krzemionkowych decyduje zawarte w nim nietrwałe szkło krzemionkowo-glinowo-potasowe. Składnik ten powstaje w wyniku wydzielania w trakcie spalania węgla substancji nieorganicznej, następnie jej stopienia i zestalenia w postaci bardzo drobnych kulistych cząstek. Ilość fazy szklistej w składzie popiołów krzemionkowych jest zróżnicowana i zawiera się w granicach 30-80% (Giergiczny, 2006).

Ilość SiO_2 oraz udział szkła w składzie popiołów lotnych decydują o zawartości aktywnego SiO_2 , czyli krzemionki, która reaguje w normalnych warunkach z Ca(OH)_2 i odpowiada za aktywność pucolanową krzemionkowych popiołów lotnych. Zgodnie z PN-EN 450-1: 2009 *Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacja i kryteria zgodności* w popiele lotnym przeznaczonym do betonów ilość zawartej w nim krzemionki nie powinna być mniejsza niż 25%.

Popioły lotne wprowadzone do betonu mogą w istotny sposób wpływać na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Dodatek ten istotnie zmniejsza dynamikę narastania wytrzymałości oraz znacząco zwiększa trwałość betonów (Neville 2000; Giergiczny 2006; Ezerskiy i Lelusz, 2011). Nie każdy popiół lotny

może być wykorzystywany w technologii betonu. O możliwości stosowania decyduje jego skład chemiczny oraz właściwości fizyczne.

W zależności od jakości spalanego węgla oraz od parametrów spalania popiół lotny może mieć różny skład chemiczny oraz zmienione właściwości fizyczne. Zmiany temperatury spalania oraz stosowane systemy odpielania powodują wahania zawartości niespalonych cząstek węgla oraz wpływają na skład granulometryczny popiołu lotnego. Tego typu wahania można zauważyć w każdym obiekcie energetycznym w różnych przedziałach czasowych.

W północno-wschodniej Polsce najczęściej występuje popiół lotny powstały ze spalania węgla kamiennego. Jednak coraz częściej są współspalane również inne paliwa, na przykład biomasa (Ścieżko i in., 2006). Powoduje to zmienność składu, jak i właściwości popiołów. Odbija się to na stopniu i charakterze wpływu tych popiołów na właściwości kompozytów cementowych oraz komplikuje prognozowanie właściwości betonów z popiołami lotnymi. W regionie tym funkcjonują dwie elektrociepłownie, a w każdym mieście znajduje się co najmniej jedna duża oraz kilka mniejszych ciepłowni.

Stosowanie popiołów lotnych ze względu na ich dużą zmienność może prowadzić do znacznych różnic właściwości betonów. Prowadzone dotychczas badania jakości popiołów lotnych miały charakter wyrwykowy. Brak jednorodności oraz niestabilność właściwości zniechęcają producentów materiałów budowlanych do szerszego stosowania popiołów jako dodatków mineralnych przy produkcji kompozytów cementowych.

2. Cel i zakres badań terenowo-laboratoryjnych

Brak stabilności właściwości popiołów lotnych stwarza trudności w ocenie ich przydatności jako dodatków do kompozytów cementowych (zapraw i betonów). W zależności od rodzaju i jakości paliwa oraz parametrów spalania można się spodziewać, że popioły lotne z różnych źródeł mogą mieć różny skład chemiczny, w tym różną ilość aktywnego SiO_2 . Można przewidywać również, że popioły lotne pochodzące z tego samego obiektu energetycznego mogą charakteryzować się różną zawartością SiO_2 w różnych przedziałach czasowych. Związane to może być, między innymi, z rodzajem stosowanego paliwa, jego przemiałem, transportem czy nawet składowaniem.

Celem przedstawionych w artykule badań terenowo-laboratoryjnych jest ocena istotności wahań ilości SiO_2 w popiołach lotnych, pozyskanych z kilku różnych obiektów energetycznych północno-wschodniej Polski w zależności od dwóch czynników: źródła pochodzenia popiołu lotnego (czynnik A) i czasu odbioru próbek popiołu (czynnik B).

Zawartość w popiele SiO_2 (y_{ij} , %) została wybrana jako wskaźnik uogólniony do oceny przydatności popiołów lotnych jako dodatków mineralnych do kompozytów cementowych. Zawartość reaktywnego SiO_2 w popiele lotnym pochodzącym ze spalania węgla kamiennego

w zasadniczy sposób wpływa na jego właściwości pucolanowe.

Przy wyborze obiektów badania, zapewniających poziomy czynnika A, zostało wytypowanych sześć źródeł wytwarzania popiołu, zlokalizowanych w północno-wschodniej Polsce. Odbiór próbek popiołów lotnych oraz badania laboratoryjne zostały przeprowadzone w sezonie grzewczym 2010/2011.

3. Badane czynniki i zakresy ich zmienności oraz metodologia badań

Przeanalizowano wpływ dwóch niezależnych czynników A i B na zmienność cechy y . Czynniki A – źródło pochodzenia popiołu lotnego, rozpatrywano na sześciu poziomach ($a = 6$). Czynniki B – okres odbioru próbek popiołu, rozpatrywano na siedmiu poziomach ($b = 7$). Jako źródła pochodzenia/pobierania popiołów wytypowano 6 obiektów energetycznych (Ai), w których spalany jest węgiel kamienny. Z każdego obiektu pobierano próbki popiołów siedmiokrotnie w odstępach miesięcznych od października do kwietnia. W obiektach energetycznych oznaczonych jako A1 i A2 węgiel był spalany w kotłach pyłowych, dodatkowo w obiekcie A1 węgiel kamienny spalano z dodatkiem biomasy. W obu tych obiektach wytrącanie popiołów odbywało się w elektrofiltrach. W pozostałych obiektach energetycznych oznaczonych jako A3, A4, A5 i A6 w procesie spalania wykorzystywano kotły miałowe oraz odpylacze cyklonowe do odpopielania spalin.

Dla każdego połączenia poziomów czynników A i B przy realizacji obserwacji uzyskano po $n = 3$ wartości wielkości y_{ijm} , gdzie i – numer poziomu czynnika A; j – numer poziomu czynnika B; m – numer obserwacji. Sumaryczna liczba obserwowanych wartości cechy y_{ijm} wynosiła $N = a \cdot b \cdot n = 6 \cdot 7 \cdot 3 = 126$.

W celu określenia cechy y w każdym ze źródeł wytwarzania popiołu lotnego raz w miesiącu (w równych odcinkach czasowych) odbierano trzy próbki popiołu lotnego. Zawartość SiO_2 (y) każdej z pobranych próbek oznaczano w laboratoriach Politechniki Białostockiej.

Zawartość SiO_2 (y) w popiołach oznaczano metodą przyspieszoną wolumetryczną zgodnie z procedurą podaną przez Katyal i innych (2008). Czas badania ilości

reaktywnej krzemionki w popiele lotnym tą metodą wynosi około 4 godzin.

Zbiór uzyskanych wartości y_{ijm} przy znanych $a = 6$ i $b = 7$ umieszczono w planie badania, który przedstawiono w tabeli 1.

4. Wyniki badań i ich analiza

Wstępna analiza wyników pomiarów (tab. 1) wykazała, że istnieje widoczny rozrzut wartości y_{ijm} przy rozpatrywaniu różnych źródeł pozyskiwania popiołu lotnego oraz w różnych miesiącach poboru popiołu, jak też w powtórzeniach próbek.

Na podstawie uzyskanych wyników określono wartości średnie zawartości SiO_2 $\bar{y}_i$ w badanych popiołach. Przeprowadzono sprawdzenie jednorodności wariancji pomiarów według kryterium Cochran. Okazało się, że przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ obliczeniowa wartość kryterium Cochran $G_{obl} = 0,0730$ nie przekracza wartości krytycznej $G_{kr}^{0,05;2,42} = 0,1531$ (Krysicki i in., 2003). Można więc uznać wariancje pomiarów za jednorodne i wyznaczyć wariancję odtwarzalności eksperymentu jako średnią z wariancji poszczególnych prób. Tak obliczona wartość wyniosła $S_0^2 = 15,0314$.

Obliczono również wartości współczynnika zmienności v_i dla każdej z prób, który charakteryzuje miarę względnej zmienności obserwowanej wielkości y . Wskazano szeroki zakres zmiany tego współczynnika – od 3,6 do 30,2%, zaś średnia wartość v całego eksperymentu wyniosła 15,8%. Oznacza to, że mimo jednorodności wariancji dla rozpatrywanej cechy charakterystyczna jest niestabilność w poszczególnych próbach.

Do oceny istotności wpływu rozpatrywanych czynników na zmienność sumarycznej bezwzględnej wielkości zawartości SiO_2 , przedstawiającej pewną przypadkową wielkość y , zastosowano dwuczynnikową analizę wariancji. Metoda ta pozwala wykazać, czy badany pojedynczy czynnik lub wspólne oddziaływanie mają istotny wpływ na zmienność cechy. Umożliwia ona również ocenę ilościowego wkładu każdego z badanych czynników na całokształt oddziaływania (Scheffe, 1999).

Tab. 1. Plan badań i wyniki pomiarów zawartości SiO_2 y_{ijm} [%] w popiołach lotnych

Numer próby	Poziomy czynników A i B	zawartość SiO_2 [%]				Wariancja [%]	Zmienność [%]
		próbka 1	próbka 2	próbka 3	średnia		
		y_{ij1}	y_{ij2}	y_{ij3}	y_{ij}		
1.	11	52,09	38,56	46,32	45,66	46,0952	14,9
2.	12	41,99	37,45	36,37	38,60	8,8937	7,7
3.	13	33,50	30,91	34,95	33,12	4,1887	6,2
4.	14	33,68	29,87	37,12	33,56	13,1520	10,8
...	...	...	...	...	...	...	...
41.	66	24,05	18,94	24,09	22,36	8,7727	13,2
42.	67	21,53	16,62	22,02	20,06	8,9180	14,9

Analiza ta pozwala na uzyskanie pozytywnej odpowiedzi tylko w przypadku istnienia istotnego wpływu. Wyniki analizy wariancji, przeprowadzonej przy założeniu zgodności wielkości y z rozkładem normalnym w stosunku do wartości średniej, podano w tabeli 2. Przy ocenie istotności wpływu rozpatrywanych czynników okazało się, że wszystkie obliczone wartości F_{obl} przewyższają odpowiednie wartości F_{kr} . W ten sposób, analiza wariancji ujawniła, że badane czynniki i ich współoddziaływanie w istotnym stopniu wpływają na zawartość SiO_2 popiołów lotnych. Poszczególne udziały wpływu czynników różnił się i wyniósł dla czynnika $A - 63,8\%$, czynnika $B - 7,0 \%$ oraz czynników A i $B - 17,3 \%$.

W związku z potwierdzonym wpływem analizowanych czynników w dalszej kolejności przeprowadzono badanie istotności wpływu ich średnich wartości na poszczególnych poziomach zmienności według schematu podanego przez Sheffe (1999). W tym celu wykorzystując dane z tabeli 3 obliczono średnie wartości na każdym z poziomów zmienności czynników A oraz B :

$$\bar{y}_{A1} = 36,21; \bar{y}_{A2} = 32,91; \bar{y}_{A3} = 17,93;$$

$$\bar{y}_{A4} = 20,74; \bar{y}_{A5} = 23,48; \bar{y}_{A6} = 17,05;$$

$$\bar{y}_{B1} = 26,11; \bar{y}_{B2} = 24,78; \bar{y}_{B3} = 24,25;$$

$$\bar{y}_{B4} = 24,54; \bar{y}_{B5} = 20,41; \bar{y}_{B6} = 29,17; \bar{y}_{B7} = 23,77.$$

Wartości $\bar{y}_{AiBj}$ podano w tabeli 3.

Następnie wyznaczono odchylenia standardowe $\bar{S}$ różnic wartości średnich $\bar{y}_{Ai}$, $\bar{y}_{Bj}$, $\bar{y}_{AiBj}$ oraz określono maksymalnie dopuszczalne błędy średnich $\bar{S} \cdot t$, które wynosiły dla czynnika $A - 1,99$; dla czynnika $B - 2,15$; dla współoddziaływania $AB - 5,28$.

Odpowiednie porównanie w parach wartości $\bar{y}_{Ai}$, $\bar{y}_{Bj}$, $\bar{y}_{AiBj}$ pokazało, że różnice między parami nie zawsze przekraczają wartości maksymalne dopuszczalnych błędów, to jest nie zawsze są istotne. Porównując wartości średnie $\bar{y}_{Ai}$ stwierdzono, że tylko dla jednej pary różnica $\bar{y}_{A1} - \bar{y}_{A6}$ okazała się mniejsza od 1,99. Oznacza to, że dla wartości zawartości SiO_2 popiołów uzyskanych z obiektów $A3$ oraz $A6$ nie ma podstaw do stwierdzenia ich istotnego zróżnicowania. Natomiast zawartości SiO_2 popiołów z pozostałych źródeł istotnie się różnią.

Dla wartości średnich $\bar{y}_{Bj}$ ustalono, że różnice $\bar{y}_{B1} - \bar{y}_{B2}$; $\bar{y}_{B1} - \bar{y}_{B3}$; $\bar{y}_{B1} - \bar{y}_{B4}$; $\bar{y}_{B2} - \bar{y}_{B3}$; $\bar{y}_{B2} - \bar{y}_{B4}$; $\bar{y}_{B2} - \bar{y}_{B7}$; $\bar{y}_{B3} - \bar{y}_{B4}$; $\bar{y}_{B3} - \bar{y}_{B7}$; $\bar{y}_{B4} - \bar{y}_{B7}$ okazały się mniejsze, niż maksymalny dopuszczalny błąd średnich (równy 2,15), co oznacza, że nie ma podstaw do stwierdzenia ich istotnego zróżnicowania między miesiącami: $B1$ i $B2$, $B1$ i $B3$, $B1$ i $B4$, $B2$ i $B3$, $B2$ i $B4$, $B2$ i $B7$, $B3$ i $B4$, $B3$ i $B7$ oraz $B4$ i $B7$. Natomiast dla pozostałych 12-tu par różnice $\bar{y}_{Bi} - \bar{y}_{Bj}$ są istotne. Oznacza to, że zawartości SiO_2 popiołów istotnie różnią się między miesiącami: $B1$ i $B5$, $B1$ i $B6$, $B1$ i $B7$, $B2$ i $B5$, $B2$ i $B6$, $B3$ i $B5$, $B3$ i $B6$, $B4$ i $B5$, $B4$ i $B6$, $B5$ i $B6$, $B5$ i $B7$ oraz $B6$ i $B7$.

Porównując wartości średnie $\bar{y}_{AiBj}$ (tab. 3) ustalono, że najwyższe zawartości SiO_2 popiołu lotnego uzyskanego z obiektu $A1$ w pierwszym przedziale czasowym ($B1$). Najniższą wartość odnotowano dla źródła $A6$ w okresie $B5$. W poszczególnych źródłach wytwarzania popiołu istotne różnice zawartości SiO_2 ustalono między miesiącami podanymi w tabeli 4.

Tab. 2. Wyniki dwuczynnikowej analizy wariancji pomiarów zawartości $SiO_2 y_{ijm}$, % badanych popiołów lotnych

Źródło wariancji	Suma kwadratów	Liczba stopni swobody	Skorygowana wariancja	Kryterium Fishera		Wpływ η [%]
				obliczeniowe F_{obl}	tablicowe F_{kr}	
Czynnik A	6748,7564	5	1349,7513	89,7954	2,35	63,8
Czynnik B	746,0912	6	124,3485	8,2726	2,23	7,0
A i B	1825,6760	30	60,8559	4,0486	1,63	17,3
Błąd pomiaru	1262,5783	84	15,0314	-	-	11,9
Razem	10583,1020	125	-	-	-	-

Tab. 3. Średnie wartości cechy $\bar{y}_{AiBj}$ przy różnych poziomach czynników A i B

Obiekt energetyczny	Kolejne miesiące sezonu grzewczego						
	$B1$	$B2$	$B3$	$B4$	$B5$	$B6$	$B7$
$A1$	45,66	38,60	33,12	33,56	30,58	41,02	30,91
$A2$	35,64	34,64	32,18	40,42	28,40	30,10	28,97
$A3$	19,98	18,06	14,34	15,10	13,19	20,49	24,34
$A4$	12,16	24,52	25,00	17,69	19,89	25,79	20,13
$A5$	24,64	21,36	24,21	20,72	19,93	35,25	18,23
$A6$	18,56	11,47	16,63	19,77	10,47	22,36	20,06

Tab. 4. Miesiące, w których ustalono istotne różnice zawartości SiO₂

	Miesiące
Obiekt A1	B1 i B2, B1 i B3, B1 i B4, B1 i B5, B1 i B7, B2 i B3, B2 i B5, B2 i B7, B3 i B6, B4 i B6, B5 i B6 oraz B6 i B7
Obiekt A2	B1 i B5, B1 i B6, B1 i B7, B2 i B4, B2 i B5, B2 i B7, B3 i B4, B4 i B5, B4 i B6 oraz B4 i B7
Obiekt A3	B1 i B3, B1 i B5, B2 i B7, B3 i B6, B3 i B7, B4 i B6, B4 i B7, B5 i B6 oraz B5 i B7
Obiekt A4	B1 i B2, B1 i B3, B1 i B4, B1 i B5, B1 i B6, B1 i B7, B2 i B4, B3 i B4, B3 i B5, B4 i B6, B5 i B6 oraz B6 i B7
Obiekt A5	B1 i B4, B1 i B7, B2 i B6, B3 i B6, B3 i B7, B4 i B6, B5 i B6 oraz B6 i B7
Obiekt A6	B1 i B2, B1 i B5, B2 i B4, B2 i B6, B2 i B7, B3 i B5, B3 i B6, B4 i B5, B5 i B6 oraz B5 i B7

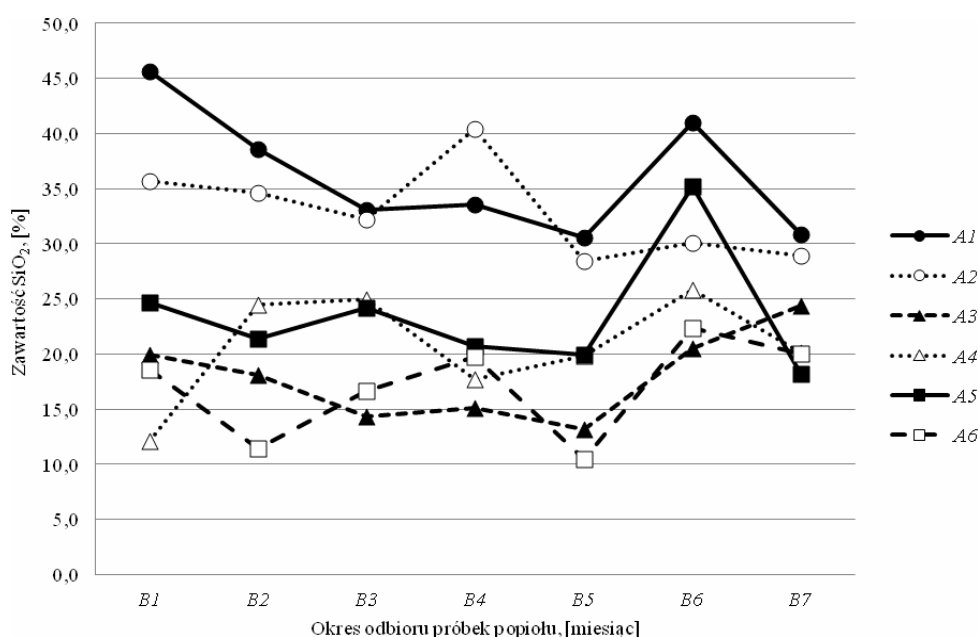
Na rysunku 2 przedstawiono wykres wahań średnich ilości SiO₂ badanych popiołów lotnych w sezonie grzewczym 2010/2011 w zależności od źródła pochodzenia popiołu lotnego. Popioły ze wszystkich rozpatrywanych obiektów energetycznych wykazują zmienną zawartość SiO₂ w poszczególnych miesiącach. Z wykresu wynika, że średnie ilości SiO₂ popiołów ze źródeł A1 i A2 znacząco różnią się od pozostałych czterech średnich i nie tworzą jednorodnej grupy. Zawartość SiO₂ w popiołach z tych źródeł jest niemal dwukrotnie większa od pozostałych. Dwa spośród monitorowanych obiektów energetycznych były to elektrociepłownie, pozostałe to ciepłownie. W elektrociepłowniach stosuje się odmienne systemy spalania węgla i odpopielania spalin, które są znacznie efektywniejsze. Rezultat takich rozwiązań technologicznych jest widoczny na wykresie w postaci znacznie większych zawartości reaktywnej krzemionki w badanych popiołach lotnych. Tylko w popiołach z obiektów A1 i A2 ilość reaktywnej krzemionki jest

większa od wymaganej przez normę PN-EN 450-1 ilości 25%, więc można rozważać stosowanie tych popiołów jako dodatki do betonów.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że oba rozpatrywane czynniki – źródło pochodzenia popiołu lotnego (czynnik A) oraz okres odbioru próbek popiołu (czynnik B), istotnie wpływają na zawartość

SiO₂ (y) w popiołach lotnych uzyskanych w ciągu siedmiu miesięcy sezonu grzewczego z wytypowanych sześciu obiektów energetycznych w północno-wschodniej Polsce. Stopień wpływu rozpatrywanych czynników jest różny. Okres odbioru próbek (czynnik B) wpływa znacznie mniej niż źródło pochodzenia popiołu (czynnik A). Udział wpływu tych czynników wyniósł dla czynnika A – 63,8%, a dla czynnika B – 7,0 %. Wykryto również, że średnie



Rys. 2. Zależność średnich wartości zawartości SiO₂ w popiołach lotnych od okresu odbioru próbek (czynnik B) uzyskanych z różnych obiektów energetycznych (czynnik A)

wartości zawartości SiO_2 popiołów w podgrupach A1 i A2 znacząco różnią się od pozostałych czterech średnich. Tylko popioły z obiektów A1 i A2 mogą znaleźć zastosowanie w produkcji betonu, ponieważ zawartość reaktywnego SiO_2 przekracza w nich 25%, które jest wymagane przez normę PN-EN 450-1. W dalszych badaniach te dwie podgrupy danych będą rozpatrywane osobno.

Literatura

- Bastian S. (1980). *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*. Arkady, Warszawa.
- Ezerskiy V., Lelusz M. (2011). Kinetyka procesu hydratacji kompozytów cementowych z popiołem lotnym. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 3/2011, 247-252.
- Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A. (2005). Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. *Gospodarka surowcami mineralnymi*, Vol. 21, Nr 1, 23-42.
- Girgiczny Z. (2006). Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków.
- Hycnar J. J. (2009). Eurocoash – weryfikacja popiołów ze spalania węgla. *Energetyka-Nauka-Przemysł*, 1/2009, 48-53.
- Katyal N. K., Sharma J. M., Dhawan A. K., Ali M. M., Mohan K. (2008). Development of rapid method for estimation of reactive silica in fly ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 1, 104-106.
- Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M. (2003). Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Część II. Statystyka matematyczna. PWN, Warszawa.
- Kurdowski W. (2010). *Chemia cementu i betonu. Stowarzyszenie Producentów Cementu Kraków*, PWN, Warszawa.
- Mały Rocznik Statystyczny Polski (2000-2012). GUS, Warszawa.
- Neville A. M. (2000). Właściwości betonu. *Polski Cement Sp. z o.o.*, Kraków.
- Nocuń-Wczelik W. (1997). Immobilizacja metali ciężkich przez fazę C-S-H. *Cement-Wapno-Beton*, 5/1997, 188-191.
- Scheffe H. (1999). *The Analysis of variance*. John Wiley & Sons, New York.
- Ścieżko M., Zuwała J., Pronobis M. (2006). Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową. *Energetyka i Ekologia*, 3/2006, 207-220.

EVALUATION OF REACTIVE SiO_2 CONTENT IN FLY ASHES FROM POWER PLANTS IN NORTH-EASTERN POLAND

Abstract: In the presented paper the results of field-laboratory investigation concerning the fluctuation in reactive SiO_2 content in fly ashes from power plants in north-eastern Poland. Experiments were conditioned on the basis of the SiO_2 content evaluation depending on two factors: the fly ash source (factor A) and the reception sample period (factor B). The use of variance analysis in evaluating the collected data allowed to conclude that both of the considered factors significantly influenced the fly ashes SiO_2 contents. The fly ashes were monitored during seven months of the 2010/2011 heating season. The influence share of factor A was 64% whereas for the case of factor B it was 7%. This means that factor B influences less than factor A.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji projektu badawczego finansowanego ze środków MNiSW w latach 2010-2012.

EFEKTY ENERGETYCZNE, EKONOMICZNE I EKOLOGICZNE TERMOMODERNIZACJI BUDYNKU HOTELOWEGO W BIAŁYMSTOKU

Joanna PIOTROWSKA-WORONIAK*, Grzegorz WORONIAK

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-531 Białystok

Streszczenie: W hotelu wybudowanym w latach 1973-1975, charakteryzującym się wysokim wskaźnikiem rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania wynoszącym 342,84 kWh/m²rok, przeprowadzono kompleksową termomodernizację bryły budynku, modernizację instalacji c.o. i c.w.u. oraz źródła ciepła. Określono roczne efekty energetyczne, ekonomiczne i ekologiczne, jakie można uzyskać w wyniku tych usprawnień. Przedstawiono zakres przeprowadzenia prac termomodernizacyjnych budynku i zaproponowane rozwiązanie technologiczne modernizacji starej kotłowni olejowej wykorzystującej energię odnawialną do wspomagania podgrzewu ciepłej wody użytkowej.

Słowa kluczowe: kolektory słoneczne, termomodernizacja, energia cieplna, emisja zanieczyszczeń.

1. Wprowadzenie

Budynki wznoszone w latach 1967-1976 charakteryzowały się wysokim wskaźnikiem rocznego zapotrzebowania na energię cieplną. Przeciętne sezonowe zużycie energii na ogrzanie 1m² powierzchni wynosiło 240-280 kWh/m²rok. W tamtym okresie wymagany współczynnik przenikania ciepła ścian zewnętrznych wynosił 1,16 W/m²K.

Bez przeprowadzenia termomodernizacji, takie budynki są bardzo energochłonne i drogie w eksploatacji. Dlatego, jak najszybciej powinniśmy podjąć działania zmierzające do racjonalizacji i oszczędności energii, gdyż tania energia w postaci surowców naturalnych należy już do przeszłości.

Można zauważyć natomiast, że rosnące koszty pozyskiwania energii zaczynają coraz silniej oddziaływać na wybór technologii i opłacalności inwestycji. Wymogi ochrony środowiska oraz wzrost cen energii konwencjonalnej skłaniają potencjalnych inwestorów do stosowania odnawialnych źródeł energii. Coraz bardziej oczywiste staje się korzystanie ze źródeł czystej energii, jaką jest energia promieniowania słonecznego, wiatru, wód, czy energia geotermiczna (Zawadzki, 2003; Dąbrowski, 2009).

W budynkach poddawanych termomodernizacji, aby ograniczyć koszty ogrzewania i podgrzewu ciepłej wody użytkowej należy zmniejszyć ilość zużywanej energii cieplnej. Wiąże się to jednak z wprowadzeniem zmian

w systemie ogrzewania i instalacji c.w.u., jak również poprawą izolacyjności termicznej przegród.

W artykule przedstawiono sposób przeprowadzenia kompleksowej termomodernizacji budynku hotelowego i wynikające z tego efekty energetyczne, ekologiczne i ekonomiczne.

2. Efekty ekologiczne przedsięwzięć termomodernizacyjnych

Aby wyznaczyć efekty ekologiczne w budynku należy określić wielkość emisji zanieczyszczeń przed i po modernizacji.

Wielkości rocznych emisji zanieczyszczeń można obliczyć korzystając ze wskaźników emisji zanieczyszczeń zamieszczonych w Materiałach Informacyjno-Instruktażowych Ministerstwa Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa (1996), w których to dla różnych rodzajów paliw kopalnych zdefiniowano standardowe rodzaje palenisk, a następnie paleniskom przyporządkowano wskaźniki emisji zanieczyszczeń. Wyniki obliczeń są podstawą do naliczania opłat i kar za korzystanie ze środowiska.

Efekty ekologiczne, jakie można uzyskać w wyniku przeprowadzonej termomodernizacji budynku wyznaczono jako różnicę wielkości emisji substancji zanieczyszczających wprowadzanych do powietrza przy energetycznym spalaniu oleju opałowego przed i po termomodernizacji. Określono je z zależności:

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.piotrowska@pb.edu.pl

$$\Delta E = E_0 - E_1 \text{ [Mg/rok]} \quad (1)$$

gdzie: E_0 są to roczne emisje substancji zanieczyszczających powstające w wyniku spalania oleju opałowego przed termomodernizacją w Mg/rok, a E_1 roczną emisją substancji zanieczyszczających powstające w wyniku spalania oleju opałowego po termomodernizacji w Mg/rok.

3. Efekty energetyczne przedsięwzięć termomodernizacyjnych

Efekty energetyczne, jakie można uzyskać w wyniku przeprowadzonej termomodernizacji budynku w artykule wyznaczono jako różnicę zapotrzebowania na moc ciepłą na cele c.o. i c.w.u. oraz zapotrzebowania na energię ciepłą na cele c.o. i c.w.u., przed i po termomodernizacji. Określono je z następujących dwóch zależności:

– zmniejszenie obliczeniowego zapotrzebowania na moc ciepłą:

$$\Delta q = q_0 - q_1 \text{ [kW/rok]} \quad (2)$$

gdzie: q_0 jest zapotrzebowaniem na moc ciepłą (c.o., c.w.u.) przed wykonaniem usprawnienia termomodernizacyjnego w kW/rok, a q_1 zapotrzebowaniem na moc ciepłą (c.o., c.w.u.) po wykonaniu usprawnienia termomodernizacyjnego w kW/rok,

– zmniejszenie obliczeniowego zapotrzebowania na energię ciepłą:

$$\Delta Q = Q_0 - Q_1 \text{ [GJ/rok]} \quad (3)$$

gdzie: Q_0 jest zapotrzebowaniem na energię ciepłą na cele grzewcze i cele ciepłej wody użytkowej przed wykonaniem usprawnienia termomodernizacyjnego w GJ/rok, a Q_1 zapotrzebowaniem na energię ciepłą na cele grzewcze i uzyskanie ciepłej wody użytkowej po wykonaniu usprawnienia termomodernizacyjnego w GJ/rok.

Zmniejszenie obliczeniowego zapotrzebowania na energię ciepłą przez poszczególne przegrody budowlane: ściany zewnętrzne, stropodachy, okna i drzwi zewnętrzne obliczono zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 17 marca 2009 r. (Dz. U. nr 223 z 2009 r., poz. 1459).

4. Efekty ekonomiczne przedsięwzięć termomodernizacyjnych

Oceny efektywności ekonomicznej rozpatrywanych wariantów dokonano w oparciu o prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych, które określono z zależności:

$$SPBT = \frac{N}{\Delta K} \text{ [lata]} \quad (4)$$

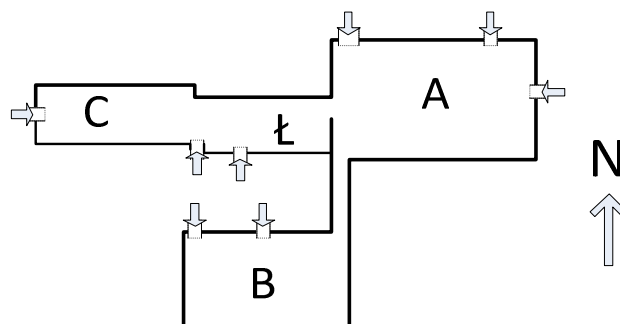
gdzie: N są to wymagane nakłady inwestycyjne w zł, a ΔK są oszacowanymi oszczędnościami eksploatacyjnymi w zł/rok.

5. Ogólna charakterystyka budynku

5.1. Opis techniczny budynku

Hotel został wybudowany w latach 1973-1975. Zlokalizowany jest w Białymstoku. Znajduje się w nim 50 pokoi, z których każdy wyposażony jest w łazienkę z natryskiem i umywalką. Łączna ilość osób mogących wypoczywać w hotelu wynosi 80. Ponadto do dyspozycji odwiedzających jest restauracja, kawiarnia, bar nocny z dyskoteką oraz sala konferencyjna na 90 osób.

Hotel składa się z trzech połączonych budynków oznaczonych, na rysunku 1 jako „A”, „B” i „C” połączonych łącznikiem „Ł”. Część „A” wykonana jest w technologii tradycyjnej. Jest to część podpiwniczona, parterowa. Części „B” i „C” wykonane są z elementów wielkopłytowych systemu OWT/67. Część „B” posiada trzy kondygnacje nadziemne, część „C” dwie, obie części są podpiwniczone i połączone parterowym łącznikiem.



Rys. 1. Widok budynków hotelowych części A, B i C

W tabeli 1 zestawione zostały wyliczone wartości współczynników przenikania ciepła U [W/m^2K] przegród budowlanych w hotelu zgodnie z normą PN-EN ISO 6946:2008 *Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczeń przed modernizacją*.

Tab. 1. Zestawienie wartości obliczonych współczynników przenikania ciepła U_0 [W/m^2K] przegród budowlanych stan przed termomodernizacją

Rodzaj przegrody zewnętrznej	U_0 [W/m^2K]
ściany piwnic	0,45-3,18
ściany kondygnacji nadziemnych	0,69-1,13
stropodachy wentylowane „A”, „B”	0,64
stropodach pełny „C”	0,51
strop nad piwnicą	1,18
okna	3,00
drzwi	5,10

Współczynniki przenikania ciepła większości przegród w znacznym stopniu przekraczają aktualnie wymagane wartości. W celu zmniejszenia energochłonności budynku na cele grzewcze i wentylacyjne należy zdecydowanie poprawić stan izolacyjności termicznej poszczególnych przegród budowlanych. Wskazana jest wymiana starych okien w budynku na okna o niskim współczynniku U (nie większym niż 1,7) oraz wskazana jest wymiana starych drzwi zewnętrznych na nowe drzwi szczelne, o niskim współczynniku U .

5.2. Dane budynku i jego charakterystyka energetyczna

W tabeli 2 przedstawiono ogólną charakterystykę techniczną budynku.

Koszt produkcji 1 GJ energii cieplnej wytwarzanej w kotłowni olejowej wynosi 86,72 zł/GJ. Roczne koszty eksploatacji budynku wynoszą 321 593 zł brutto.

6. Ocena stanu technicznego instalacji c.o. i c.w.u. oraz źródła ciepła

Instalacja centralnego ogrzewania w budynku hotelu jest instalacją wodną, dwururową, pompową z rozdziałem dolnym. Rurociągi, grzejniki oraz izolacja cieplna przewodów są w złym stanie technicznym. Ze względu

na bardzo zły stan techniczny instalacji c.o. zaleca się jej wymianę.

Zanieczyszczenie grzejników spowodowało spadek ich wydajności cieplnej. Istniejące zawory grzejnikowe nie dają możliwości jakiegokolwiek regulacji. Przewody i zawory przygrzejnikowe często przeciekają. Instalacja c.o. charakteryzuje się dużą bezwładnością cieplną. Odpowietrzanie instalacji c.o. odbywa się poprzez centralną sieć odpowietrzającą.

Instalacja c.w.u. jest również w złym stanie technicznym, brak jest izolacji cieplnej przewodów cyrkulacyjnych.

W kotłowni zamontowane są trzy niskotemperaturowe, olejowe kotły Ferroli (rok produkcji 1986) o łącznej mocy cieplnej około 300kW, które są w złym stanie technicznym. Pozostałe urządzenia technologiczne w kotłowni są wyeksploatowane. Zabezpieczenie instalacji c.o. przed przyrostem objętości czynnika grzewczego stanowi naczynie przeponowe zamknięte. Istniejącą instalację centralnego ogrzewania można scharakteryzować współczynnikami sprawności przedstawionymi w tabeli 3.

Ciepła woda użytkowa przygotowywana jest w kotłowni olejowej w dwóch podgrzewaczach pojemnościowych o pojemności 4 000dm³. Sprawność istniejącego systemu c.w.u. można scharakteryzować współczynnikami sprawności przedstawionymi w tabeli 4.

Tab. 2. Ogólna charakterystyka techniczna budynku hotelu

Technologia budynku	Rok budowy	Kubatura [m ³]	Pow. użytkowa [m ²]	Zużycie ciepła Q_0 [GJ]			Zapotrzebowanie na moc cieplną q_0 [kW] na cele:	
				c.o. *)	c.o.**)	c.w.u.	c.o.	c.w.u.
część „A” tradycyjna; część B i C – OWT 67	1973-75	10 282	3 476	1 949,8	3 542,51	769,55	264,53	39,15

*) Obliczeniowe zużycie ciepła na cele c.o. w standardowym sezonie grzewczym bez uwzględnienia sprawności systemu grzewczego

**) Obliczeniowe zużycie ciepła na cele c.o. w standardowym sezonie grzewczym z uwzględnieniem sprawności systemu grzewczego

Tab. 3. Sprawności systemu grzewczego przed termomodernizacją

Wyszczególnienie współczynnika	Wartość
Wytwarzania ciepła (kotły olejowe z automatyką ulegającą awariom)	$\eta_{g0} = 0,86$
Przesyłania ciepła (instalacja c.o. z przewodami w złym stanie technicznym, z zanieczyszczeniami technologicznymi)	$\eta_{d0} = 0,80$
Regulacji i wykorzystania systemu grzewczego (instalacja c.o. z przewodami w złym stanie technicznym, z zanieczyszczeniami technologicznymi)	$\eta_{e0} = 0,80$
Akumulacji ciepła (brak zbiornika buforowego)	$\eta_{s0} = 1,00$
Uwzględnienie przerw w ogrzewaniu w okresie tygodnia	$w_{t0} = 1,00$
Uwzględnienie przerw w ogrzewaniu w okresie doby	$w_{d0} = 1,00$
Sprawność całkowita systemu grzewczego	$\eta_0 = \eta_g \cdot \eta_d \cdot \eta_e \cdot \eta_s = 0,5504$

Tab. 4. Sprawności instalacji ciepłej wody użytkowej przed termomodernizacją

Wyszczególnienie współczynnika	Wartość
Sprawność wytworzenia nośnika ciepła (kocioł olejowy z automatyką ulegającą awariom)	$\eta_{w,g0} = 0,86$
Sprawność transportu (dystrybucji) ciepłej wody – (instalacja średnia c.w.u. od 30-100 punktów poboru wody)	$\eta_{w,d0} = 0,65$
Sprawność akumulacji ciepłej wody (zasobnik w systemie według standardu z lat 1995-2000)	$\eta_{w,s0} = 0,72$
Sprawność wykorzystania	$\eta_{w,e0} = 1,00$
Sprawność całkowita	$\eta_{w,tot 0} = \eta_{w,g0} \cdot \eta_{w,d0} \cdot \eta_{w,s0} \cdot \eta_{w,e0} = 0,4025$

7. Zakres modernizacji instalacji centralnego ogrzewania, źródła ciepła, sposobu przygotowywania ciepłej wody użytkowej i bryły budynku

7.1. Modernizacja instalacji centralnego ogrzewania

W hotelu w ramach modernizacji systemu grzewczego wymieniono starą instalację c.o. na nową dwururową, pompową (materiał: stal węglowa niestopowa ocynkowana zewnętrznie), wyposażono ją w nowe grzejniki stalowe płytowe z zaworami termostatycznymi z ustaloną nastawą wstępną. Usunięto centralną sieć odpowietrzającą i zamontowano automatyczne odpowietrzniki na końcach pionów instalacyjnych. Pod pionami c.o. zamontowano ręczne zawory równoważące, gdyż istniejące zawory odcinające nie dawały żadnej możliwości odcięcia pionu c.o. oraz były w bardzo złym stanie technicznym. Zastosowanie takich zaworów umożliwi utrzymanie wartości wybranych parametrów czynnika grzewczego w zadanych granicach w całym okresie eksploatacji systemu grzewczego i umożliwi wyeliminowanie ewentualnych zakłóceń spowodowanych działaniem termoregulatorów. Na głównych odgałęzieniach systemu instalacji c.o. zalecono montaż automatycznych zaworów równoważących. Instalacja c.o. została zaizolowana cieplnie pianką poliuretanową o grubości zgodnej z Warunkami Technicznymi.

Koszt modernizacji instalacji c.o. wyniósł około 370 621 zł brutto.

7.2. Modernizacja źródła ciepła

W hotelu modernizacja źródła ciepła obejmowała wymianę wyeksploatowanej i awaryjnej kotłowni olejowej. Przewymiarowane kotły zastąpiono nowymi, dostosowanymi do projektowego obciążenia cieplnego budynku kotłami olejowymi o wyższej sprawności eksploatacyjnej. Kotły współpracują z kolektorami słonecznymi w układzie biwalentnym i realizują priorytetowy podgrzew c.w.u..

Koszt modernizacji kotłowni olejowej wyniesie około 250 120 zł brutto.

Łączny koszt modernizacji instalacji c.o. i kotłowni olejowej z wykonaniem niezbędnych prac demontażowo – budowlanymi oraz wykonaniem niezbędnej dokumentacji technicznej wyniesie około 620 740 zł brutto.

Całkowita sprawność systemu grzewczego zmieni się z $\eta_0 = 0,5504$ na $\eta_1 = 0,8037$.

7.3. Modernizacja instalacji ciepłej wody użytkowej w hotelu

Proponowane jest usprawnienie dotyczące zmniejszenia kosztów przygotowania ciepłej wody użytkowej poprzez zmianę sposobu jej podgrzewu. Zakłada się wykorzystanie kolektorów słonecznych produkujących energię cieplną na potrzeby c.w.u. w okresie letnim. W pozostałym okresie podgrzew c.w.u. będzie wspomagany kotłem olejowym, który będzie również zabezpieczał potrzeby centralnego ogrzewania.

Ze względu na zły stan techniczny instalacji c.w.u. przewidziano wykonanie nowej instalacji.

Proponowany system grzewczy c.w.u. jest układem solarnym współpracującym z biwalentnym pojemnościowym podgrzewaczem c.w.u.. W okresie letnim całkowite zapotrzebowanie na c.w.u. pokrywane będzie przez układ dwudziestu jeden kolektorów płaskich o powierzchni absorbera $p = 2,53 \text{ m}^2$. W okresie zimowym oraz w przypadku, gdy kolektory nie będą w stanie pokryć zapotrzebowania na c.w.u., wspomagającym źródłem ciepła będzie kocioł olejowy, podgrzewający priorytetowo c.w.u., jak również zabezpieczający potrzeby cieplne centralnego ogrzewania.

W układzie przygotowania c.w.u. założono podgrzew wody w trzech zasobnikach o pojemności 1000 dm^3 każdy, pełniących jednocześnie funkcję bufora. Zasobniki ogrzewane są z baterii 21 kolektorów słonecznych połączonych ze sobą równolegle w cztery pakiety. Sposób montażu kolektorów i połączeń hydraulicznych pokazano na rysunku 2. Zasobniki te stanowią wstępny podgrzew c.w.u.. Jeśli temperatura c.w.u. nie osiągnie wymaganej temperatury to zostanie ona „dogrzana” w kolejnym czwartym szeregowo połączonym zasobniku o pojemności 1000 dm^3 „obsługiwanym” przez kocioł olejowy podgrzewający priorytetowo c.w.u. i zabezpieczający potrzeby cieplne instalacji centralnego ogrzewania. Aby nie dochodziło do nadmiernego wychłodzenia wody w zasobniku z kotłem olejowym, a zatem niepotrzebnego włączania się kotła, zainstalowano w układzie pompę przeładowującą wraz z automatycznym sterownikiem procesu przeładowania. Sterownik sprawdza różnicę temperatury pomiędzy zasobnikiem podgrzewanym za pomocą kolektorów słonecznych i zasobnikiem

dogrzewającym. Jeśli różnica temperatur jest zbyt duża (przekracza wartość ustawioną na regulatorze) to włącza się pompa, która przepompowuje wodę z zasobnika dogrzewającego do zasobników wstępnych. Taki układ gwarantuje minimalizację uruchomień kotła olejowego i oszczędność paliwa.

Schemat technologiczny zaproponowanego rozwiązania kotłowni olejowej współpracującej z kolektorami słonecznymi przedstawiono na rysunku 2.

Średnioroczna ilość energii uzyskana z kolektorów słonecznych, ustawionych pod kątem 45° , skierowanych na południe o łącznej powierzchni absorbera $53,13 \text{ m}^2$ ($21 \text{ sztuk} \times 2,53 \text{ m}^2$ absorbera każdy) wyniesie około $202,32 \text{ GJ/rok}$ (www.mi.gov.pl).

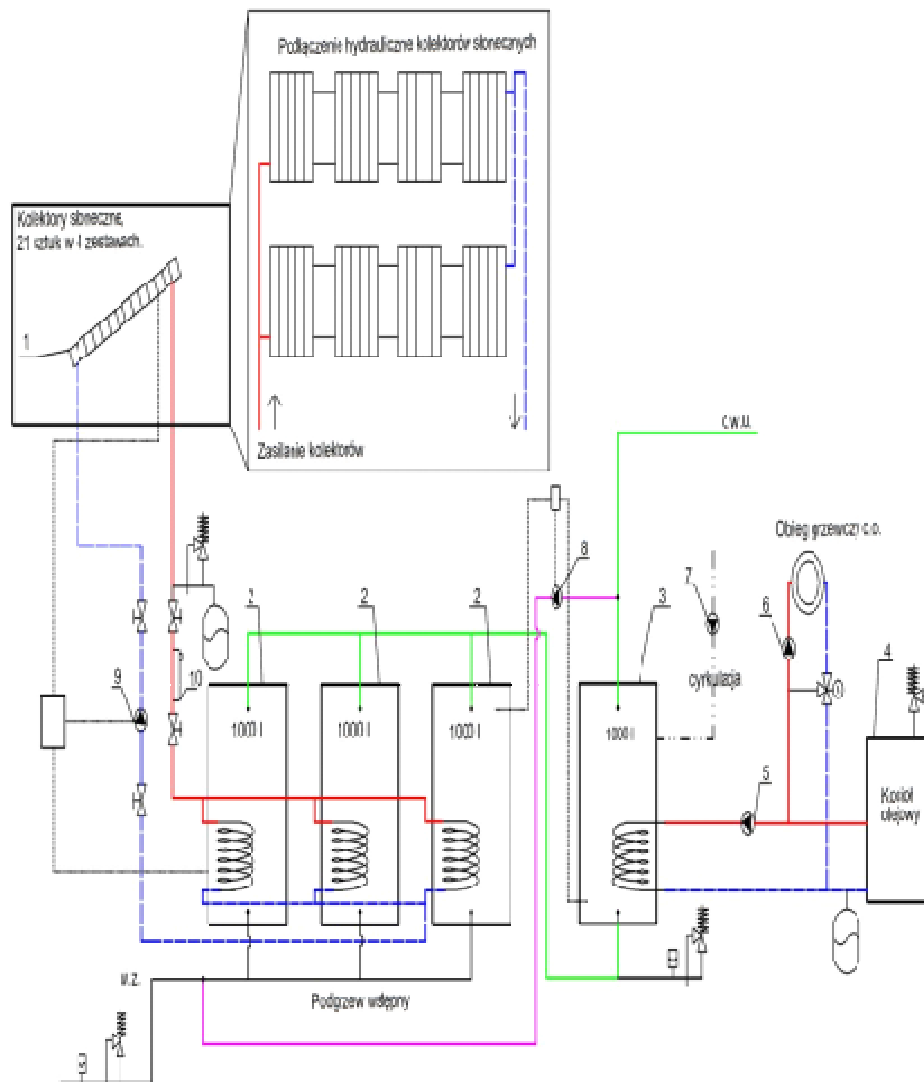
Całkowita sprawność systemu ciepłej wody użytkowej zmieniła się z $\eta_0 = 0,4025$ na $\eta_1 = 0,5741$. Na zmianę wpłynęła wymiana kotła olejowego, zaprojektowanie nowej instalacji c.w.u., zaizolowanej ciepłnie i wymiana podgrzewacza c.w.u. na nowy.

Całkowite nakłady inwestycyjne zaprojektowanej instalacji c.w.u. wykorzystującej kolektory słoneczne do podgrzewu c.w.u. wynoszą około $217\,445 \text{ zł}$ brutto.

7.4. Usprawnienia termomodernizacyjne bryły budynku

Oceniając stan techniczny budynku (tab. 1) zaproponowano usprawnienia dotyczące zmniejszenia strat ciepła przez przegrody budowlane.

W tabeli 5 zestawiono rodzaje zaproponowanych usprawnień wraz z wyliczoną optymalną grubością warstwy izolacji termicznej oraz uzyskanym po dociepleniu współczynnikiem przenikania ciepła U_1 [$\text{W/m}^2\text{K}$], planowanym kosztem przeprowadzanych robót oraz prostym czasem zwrotu inwestycji (SPBT). Z usprawnień zestawionych w tabeli 5 wyznaczono warianty termomodernizacyjne.



Rys. 2. Schemat technologiczny zmodernizowanej kotłowni olejowej wspomagającej podgrzew c.w.u. za pomocą kolektorów słonecznych, oznaczenia: 1 – kolektory słoneczne, 2 – zasobnik c.w.u. o funkcji bufora, 3 – zasobnik c.w.u. dogrzewający, 4 – kocioł olejowy, 5 – pompa obiegowa c.w.u., 6 – pompa obiegowa c.o., 7 – pompa cyrkulacyjna, 8 – pompa przeładunkowa, 9 – pompa obiegu solarnego, 10 – separator powietrza

Tab. 5. Usprawnienia termomodernizacyjne wraz z optymalną grubością warstwy izolacji termicznej (Audyt energetyczny budynku, 2012), planowanym kosztem robót i prostym zwrotem inwestycji SPBT

Rodzaj usprawnienia	Rodzaj izolacji termicznej	Optymalna grubość [cm]	U_1 [W/m ² K]	Planowany koszt robót [zł]	SPBT [lat]
Częściowe zamurowanie okien piwnic	–	–	0,18	10 157	6,16
Wymiana drzwi zewnętrznych przeszklonych	wymiana	–	1,70	8 290	6,19
Docieplenie stropodachów wentylowanych	granulat z wełny mineralnej skalnej lub szklanej, lub masa celulozowa np. „ekofiber”	16	0,21	112 174	7,02
Wymiana okien kondygnacji nadziemnych ze zmniejszeniem powierzchni	Wymiana/zamurowanie	–	1,70	266 159	7,18
Docieplenie stropodachu pełnego	twarde płyty dachowe ze styropianu lub wełny mineralnej	12	0,20	10 620	8,66
Docieplenie ścian zewnętrznych kondygnacji nadziemnych części „A”	styropian, metoda BSO	14	0,22	58 804	8,89
Docieplenie ścian zewnętrznych kondygnacji nadziemnych części „B” i „C”		16	0,18	144 788	12,17
Wymiana drzwi zewnętrznych drewnianych	wymiana	–	1,70	7 034	14,53
Wymiana drzwi zewnętrznych piwnic	wymiana	–	1,70	4 768	27,78
Docieplenie ścian zewnętrznych piwnic części „A”	styropian metoda BSO oraz styropian wodoodporny ekstrudowany lub TERMO-W dla ścian zagłębionych w gruncie	10	0,22	59 348	38,18
Docieplenie ścian zewnętrznych piwnic części „B” i „C”		14	0,22	78 590	80,51

8. Wyniki uzyskanych efektów ekologicznych, energetycznych i ekonomicznych po przeprowadzeniu termomodernizacji budynku hotelu i modernizacji źródła ciepła

8.1. Uzyskane efekty ekologiczne

W wyniku przeprowadzonej termomodernizacji budynku i modernizacji źródła ciepła, uzyskano zmniejszenie emisji zanieczyszczeń wprowadzanych do atmosfery podczas spalania oleju opałowego przed i po termomodernizacji. Uzyskane efekty ekologiczne wyliczono w oparciu o zależności oraz dane wskaźnikowe emisji zanieczyszczeń dla oleju opałowego zamieszczone w załączniku 3 Materiałów Informacyjno-Instruktażowych MOŚZNiL (1996).

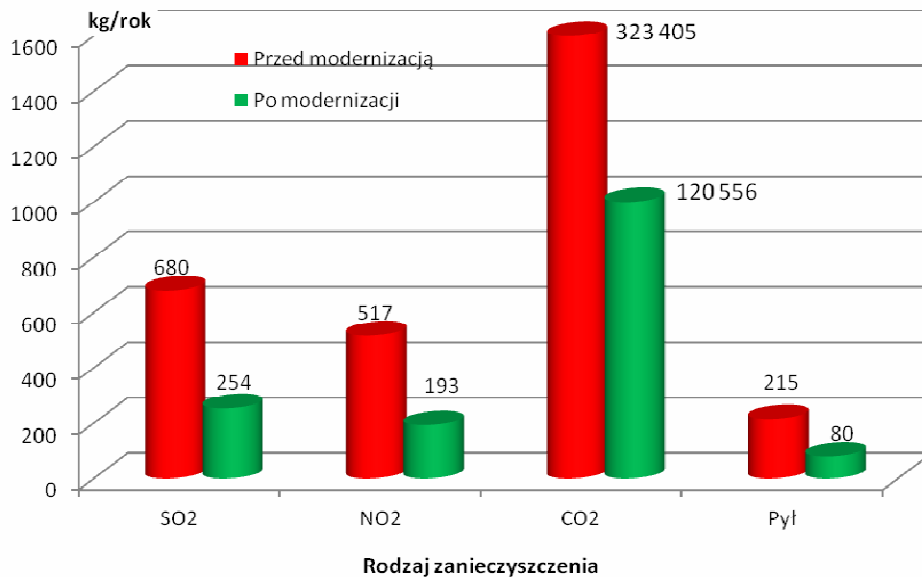
W tabeli 6 przedstawiono wyniki obliczeń emisji zanieczyszczeń przed i po termomodernizacji, przy

wartości opałowej paliwa 40,19 MJ/kg Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (2012).

Porównanie wartości emisji poszczególnych zanieczyszczeń przed i po termomodernizacji w formie graficznej przedstawiono na rysunku 3.

Tab. 6. Efekty ekologiczne uzyskane w wyniku termomodernizacji budynku i modernizacji źródła ciepła

Wyszczególnienie zanieczyszczeń	Emisja zanieczyszczeń [kg/rok]		Redukcja zanieczyszczeń	
	Przed modernizacją	Po modernizacji	[kg/rok]	[%]
SO ₂	680	254	426	62,65
NO ₂	517	193	324	62,67
CO ₂	323 405	120 556	202 849	62,72
Pył	215	80	135	62,79



Rys. 3. Emisje poszczególnych rodzajów zanieczyszczeń przed i po termomodernizacji budynku

8.2. Uzyskane efekty energetyczne

Po wykonaniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych bryły budynku zaleconych i przedstawionych w tabeli 5 oraz modernizacji instalacji centralnego ogrzewania i źródła ciepła sezonowe zapotrzebowanie na ciepło po termomodernizacji wyniesie około 1 310,67 GJ/rok, zaś obliczeniowe zapotrzebowanie na moc cieplną na cele grzewcze wyniesie około 163,90 kW.

Obliczeniowe zapotrzebowanie na moc cieplną na cele grzewcze po wykonaniu usprawnień termomodernizacyjnych w budynku zmniejszy się rocznie o 100,63 kW, a na zapotrzebowanie energię cieplną na cele grzewcze zmniejszy się rocznie o 2 231,84 GJ.

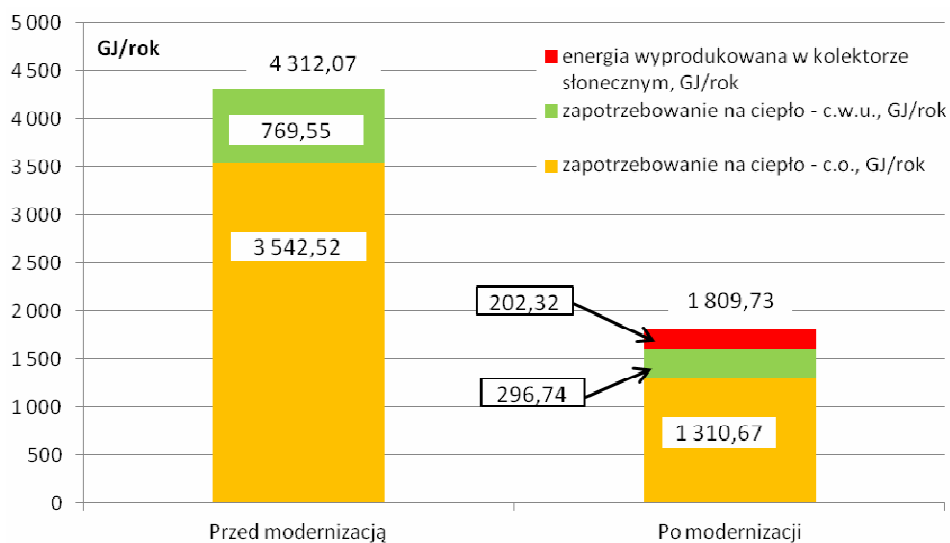
Modernizując instalację c.w.u. i montując kolektory słoneczne do wspomagania podgrzewu c.w.u. zapotrzebowanie na ciepło do podgrzewu c.w.u. i cyrkulacji z uwzględnieniem sprawności, ale jeszcze bez

uwzględnienia „darmowej” energii cieplnej z kolektorów słonecznych wynosi około 499,06 GJ/rok. Średnia roczna ilość energii wyprodukowana w kolektorach słonecznych wynosi 202,32 GJ/rok. Stąd zapotrzebowanie na energię cieplną po uwzględnieniu energii pozyskiwanej z kolektorów słonecznych wynosi około 296,74 GJ/rok.

Zmniejszenie obliczeniowego zapotrzebowania na energię cieplną na cele c.w.u. po wykonaniu modernizacji instalacji c.w.u. z wykorzystaniem kolektorów słonecznych wyniesie około 472,81 GJ.

W tabeli 7 przedstawiono charakterystykę energetyczną budynku przed i po wykonaniu termomodernizacji.

Na rysunku 4 przedstawiono sezonowe zapotrzebowanie na ciepło na cele c.o. z uwzględnieniem sprawności systemu oraz zapotrzebowanie na ciepło na cele c.w.u. przed i po termomodernizacji.



Rys. 4. Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło na cele c.o. i c.w.u. przed i po modernizacji

Tab. 7. Efekty energetyczne termomodernizowanego budynku

Lp.	Charakterystyka energetyczna budynku	Stan przed termomodernizacją	Stan po termomodernizacji
1	Obliczeniowa moc cieplna systemu grzewczego [kW]	264,53	163,90
2	Obliczeniowa maksymalna moc cieplna systemu grzewczego na przygotowanie c.w.u. [kW]	39,15	39,15
3	Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania budynku (bez uwzględnienia sprawności systemu grzewczego i przerw w ogrzewaniu) [GJ/rok]	1 949,80	1 108,83
4	Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania budynku z uwzględnieniem sprawności systemu c.o. [GJ/rok]	3 542,51	1 310,67
5	Obliczeniowe zapotrzebowanie na ciepło do przygotowania c.w.u. [GJ/rok]	769,55	296,74
6	Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynku bez uwzględnienia sprawności systemu grzewczego i przerw w ogrzewaniu [kWh/(m ² ·rok)]	188,70	107,30
7	Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynku z uwzględnieniem sprawności systemu grzewczego i przerw w ogrzewaniu [kWh/(m ² ·rok)]	342,84	126,83
8	Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynku z uwzględnieniem sprawności systemu grzewczego i przerw w ogrzewaniu [kWh/(m ³ ·rok)]	119,55	44,21
9	Zmniejszenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku z uwzględnieniem sprawności systemu c.o. oraz przygotowania c.w.u.	62,80 %	

Realizując pełny wariant termomodernizacji budynku zgodnie z tabeli 5 oraz modernizując instalację centralnego ogrzewania, ciepłej wody użytkowej i wykonując nową kotłownią olejową wspomagającą podgrzew c.w.u. za pomocą kolektorów słonecznych można uzyskać około 62,8% oszczędności zapotrzebowania energii cieplnej na cele c.o. i c.w.u. w stosunku do stanu wyjściowego.

8.3. Uzyskane efekty ekonomiczne

Na podstawie oceny stanu technicznego i przeprowadzonej analizy ponoszonych kosztów za ogrzewanie (roczny koszt 321 593 zł), zaproponowano usprawnienia dotyczące zmniejszenia strat ciepła przez przegrody budowlane.

Z zaproponowanych usprawnień dotyczących zmniejszenia zapotrzebowania na ciepło bryły budynku,

przedstawionych w tabeli 8 inwestor do realizacji przyjął wariant obejmujący wszystkie usprawnienia budowlane.

W tabeli 8 przedstawiono planowane całkowite nakłady, roczną oszczędność kosztów energii (w zł/rok), oszczędności procentowe zapotrzebowania na energię cieplną z uwzględnieniem sprawności zmodernizowanego systemu grzewczego i źródła ciepła. W przypadku ubiegania się o kredyt termomodernizacyjny, wyliczono wysokość premii termomodernizacyjnej, o którą może wystąpić inwestor po wykonaniu inwestycji. Przyznawana wartość premii termomodernizacyjnej przez Ustawodawcę jest wartością minimalną trzech pozycji wyliczonych z tabeli 8 na podstawie Rozporządzeń Ministra Infrastruktury (Dz. U. nr 156 z 2006 r., poz. 1118, z późn. zm.; Dz. U. nr 201 z 2008 r., poz. 1238; Dz. U. nr 223 z 2009 r., poz. 1459).

Tab. 8. Ocena pełnego wariantu przedsięwzięcia termomodernizacyjnego dla budynku hotelu (Audyt energetyczny budynku, 2012)

Wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego	Planowane koszty całkowite [zł]	Roczna oszczędność kosztów energii [zł/rok]	Procentowa oszczędność zapotrzebowania na energię [%]	Kwota kredytu [zł, %]	Premia termomodernizacyjna [zł]		
					20% kredytu	16% kosztów całkowitych	Dwukrotność rocznej oszczędności kosztów energii
docieplenie bryły budynku*, instalacja c.w.u. z kolektorami słonecznymi, nowa instalacja c.o. i kotłownia olejowa.	1 606 917	201 712	62,8%	1 606 917 (100%)	321 383	257 107	403 424

* Docieplenie bryły budynku obejmuje: docieplenie ścian piwnic części „A”, „B” i „C”, docieplenie ścian zewnętrznych kondygnacji nadziemnych części „A”, „B” i „C”, docieplenie stropodachów wentylowanych, docieplenie stropodachu pełnego nad salą konsumpcyjną (grubościami zgodnie z Tab.5), zamurowanie okien w piwnicach, wymianę okien kondygnacji nadziemnych budynku z jednoczesnym zmniejszeniem ich powierzchni, wymianę starych drzwi zewnętrznych w budynkach.

Na rysunku 5 przedstawiono zestawienie kosztów ponoszonych przez inwestora na cele grzewcze i podgrzew ciepłej wody użytkowej w budynku przed i po wykonaniu pełnej termomodernizacji budynku wraz z modernizacją instalacji grzewczej i instalacji ciepłej wody użytkowej oraz źródła ciepła.

8.3.1. Oszczędności z tytułu zmiany sposobu podgrzewu c.w.u.

Przed modernizacją opłaty, jakie ponosił właściciel hotelu za podgrzew c.w.u. wynosiły około 57 393 zł. Cena podgrzewu 1m³ c.w.u. wynosiła 41,92 zł. Zapotrzebowanie na ciepło do podgrzewu c.w.u. z uwzględnieniem sprawności wynosiło około 769,55 GJ/rok. Koszt produkcji 1 GJ energii cieplnej uzyskiwanej z oleju opałowego lekkiego wynosił 86,72 zł/GJ.

Przy wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego oszczędności finansowe związane z mniejszym zużyciem oleju opałowego będą wynosiły około 35 262 zł. Opłaty ponoszone przez hotel na podgrzew c.w.u. po modernizacji wyniosą około

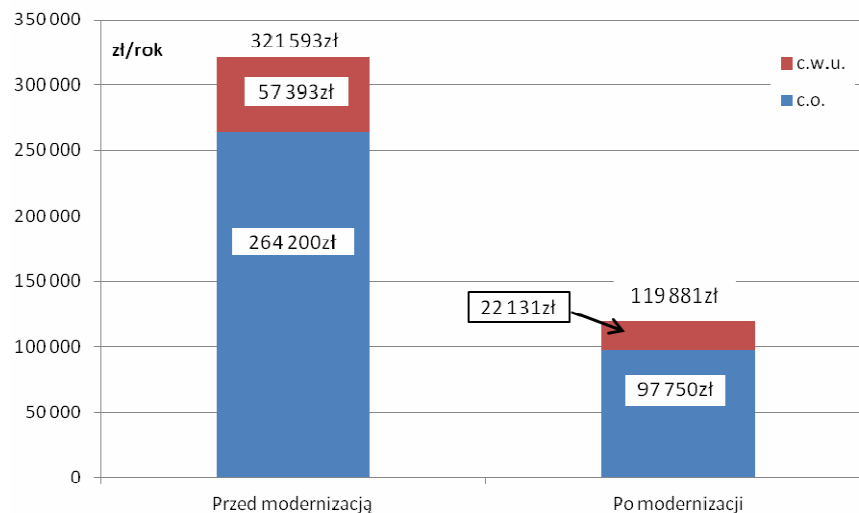
22 131 zł. Inwestycja zwróci się po SPBT = 6,12 lat (Audyt energetyczny budynku, 2012).

8.3.2. Oszczędności z tytułu zamiany źródła ciepła i modernizacji instalacji centralnego ogrzewania

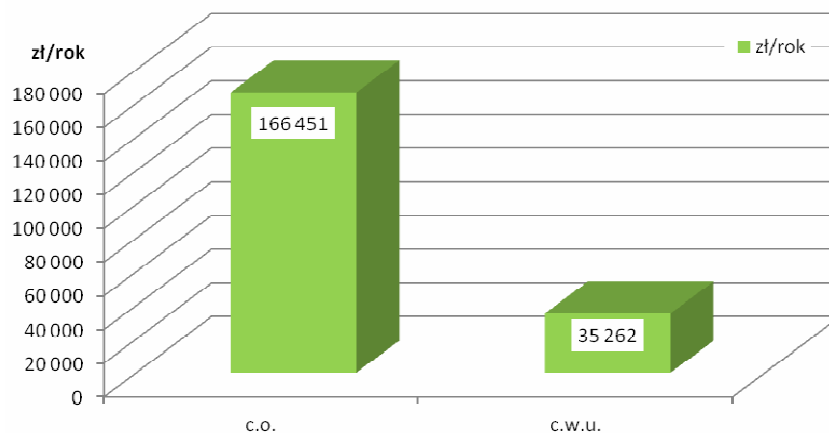
Przed modernizacją źródła ciepła i instalacji centralnego ogrzewania sezonowe zapotrzebowanie na ciepło na cele grzewcze w sezonie standardowym z uwzględnieniem sprawności systemu grzewczego wynosiło 3 542,52 GJ/rok. Opłaty, jakie ponosił właściciel hotelu wynosiły 264 200 zł/rok.

Po modernizacji źródła ciepła i instalacji centralnego ogrzewania sezonowe zapotrzebowanie na ciepło wyniesie 1 310,67 GJ. Opłaty ponoszone przez hotel po modernizacji będą około 97 750 zł. Oszczędności finansowe związane z mniejszym zużyciem oleju opałowego będą wynosiły około 166 450 zł.

Oszczędności z tytułu zmiany sposobu podgrzewu c.w.u. i w wyniku przeprowadzonej termomodernizacji budynku i modernizacji źródła ciepła pokazano na rysunku 6.



Rys. 5. Ponoszone koszty na cele c.o. i podgrzew c.w.u. przed i po modernizacji w budynku hotelu



Rys. 6. Oszczędności finansowe z tytułu zmiany sposobu podgrzewu c.w.u. oraz w wyniku przeprowadzonej pełnej modernizacji budynku

9. Podsumowanie

W artykule przedstawiono sposób przeprowadzenia termomodernizacji budynku hotelowego i modernizacji źródła ciepła wykorzystującego energię odnawialną, poprzez wspomaganie podgrzewu ciepłej wody użytkowej za pomocą kolektorów słonecznych.

W wyniku przeprowadzonej pełnej termomodernizacji budynku można liczyć na zmniejszenie projektowego obciążenia cieplnego budynku na cele grzewcze i wentylacyjne z 264,53 kW na 163,90 kW. Zmniejszeniu ulegnie również sezonowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania budynku z 3 542,51 GJ/rok w stanie istniejącym na 1 310,67 GJ/rok po termomodernizacji. Zużycie energii cieplnej do podgrzewu c.w.u. zmniejszy się z 769,55 GJ/rok na 296,74 GJ/rok. Koszt podgrzewu 1 m³ c.w.u. wynoszący przed modernizacją instalacji c.w.u. 41,92 zł/m³ (kotłownia olejowa), zmniejszy się do 16,17 zł/m³.

Zmniejszenie zapotrzebowania na energię cieplną wyniesie 62,8% w stosunku do stanu wyjściowego.

Wskaźnik sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynku w standardowym sezonie grzewczym z uwzględnieniem sprawności systemu grzewczego i przerw w ogrzewaniu zmieni się z 342,84 kWh/(m²×rok) na 126,83 kWh/(m²×rok).

Wyniki analizy ekologicznej przedstawione w artykule wykazują zasadność przeprowadzenia termomodernizacji budynku i modernizacji źródła ciepła. Możemy uzyskać redukcję wszystkich analizowanych emisji zanieczyszczeń: SO₂, NO₂, CO₂ i pyłów do powietrza atmosferycznego na poziomie około 63%.

Efekty energetyczne i ekologiczne łączą się nieodzwrotnie z efektami ekonomicznymi. Przy całkowitych nakładach inwestycyjnych na modernizację źródła ciepła, instalacji c.o., c.w.u. i termomodernizację budynku wynoszących 1 606 917 zł i planowanym zwrocie inwestycji przewidywanym po 7,97 latach, w hotelu uzyskano zmniejszenie kosztów ponoszonych na ogrzewanie i podgrzew c.w.u. z 321 593 zł/rok obecnie na 119 881 zł/rok. Czyli roczna oszczędność kosztów wynosi 201 712 zł/rok.

Inwestor realizując modernizację budynku hotelu może również liczyć po spłacie kredytu na premię termomodernizacyjną (przy założeniu, że praca w całości podlega finansowaniu zgodnie z Ustawą o wspieraniu termomodernizacji i remontów z dnia 21 listopada 2008 roku (Dz. U. Nr 223 z 2008 roku, poz. 1459, z późn. zm.), wynoszącą, w tym przypadku, 16% kosztów całkowitych, czyli 257 107 zł.

Zastosowanie odnawialnych źródeł energii do zasilania obiektu hotelowego jest rozwiązaniem racjonalnym z punktu widzenia gospodarki energetycznej, wpływu instalacji i obiektu na środowisko. Uzyskane efekty energetyczne, ekologiczne i ekonomiczne w pełni pozwalają sądzić, że termomodernizacja budynku, jak również modernizacja źródła ciepła, instalacji centralnego

ogrzewania i ciepłej wody użytkowej są w pełni uzasadnione.

Literatura

- Audyt energetyczny budynku hotelu w Białymstoku (2012). *Narodowa Agencja Poszanowania Energii S.A.*, Białystok.
- Dąbrowski J. (2009). Kolektory słoneczne do podgrzewu wody użytkowej. Efektywność i opłacalność inwestycji. *Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego*, Wrocław.
- Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (2012). Wskaźniki opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2009 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2012. *IOŚ-BIP*, Warszawa.
- Materiały Informacyjno-Instruktażowe Ministerstwa Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa (1996). Wskaźniki emisji substancji zanieczyszczających wprowadzanych do powietrza z procesów energetycznego spalania paliw. *MOŚZNiL*, seria 1/96, kwiecień, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 roku w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej. Dz. U. nr 156 z 2006 r., poz. 1118, z późn. zm.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 roku zmieniające Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. nr 201 z 2008 r., poz. 1238.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 marca 2009 roku w sprawie szczegółowego zakresu i formy audytu energetycznego oraz części audytu remontowego, wzorów kart audytów, a także algorytmów oceny opłacalności przedsięwzięcia termomodernizacyjnego. Dz. U. nr 223 z 2009 r., poz. 1459.
- Ustawą o wspieraniu termomodernizacji i remontów z dnia 21 listopada 2008 roku. Dz. U. Nr 223 z 2008 roku, poz. 1459, z późn. zm.
- Zawadzki M. (2003). Kolektory słoneczne, pompy ciepła na tak. *Wydawnictwo Polska Ekologia*, Warszawa.

THE ENERGETICAL, ECONOMICAL AND ECOLOGICAL EFFECTS OF THE HOTEL BUILDING THERMOMODERNIZATION IN BIALYSTOK

Abstract: In the hotel, built in the years 1973-1975, characterized by a high rate of annual heat demand for heating (342.84 kWh/m²year), a complex thermal modernization of the body building, the heating system and warm water one and a heat source were performed. The annual energy performance, as well as economical and ecological effects were determined, that can be obtained as a result of these improvements. The range of thermomodernization works carried out of the body building and modernization of the proposed technological solution using the old oil boiler to support renewable energy hot water heating were presented.

POSADOWIENIE BUDYNKU SZKOLNEGO W UJĘCIU NORM: PN-59/B-03020, PN-81/B-03020 i PN-EN-1997-1

Jerzy SĘKOWSKI*, Magdalena GAWLIK

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5/214, 44-100 Gliwice

Streszczenie: Poprawnie posadowiony obiekt wymaga spełnienia warunków nośności i użyteczności (naprężeń dopuszczalnych i dopuszczalnych osiadań). Rozwój wiedzy z zakresu szeroko pojętej geotechniki na przestrzeni ostatnich lat skutkował między innymi zmianami norm projektowania wspomnianych posadowień. W Polsce w ostatnich sześćdziesięciu latach było ich kilka. Różniła je filozofia projektowania a także procedury obliczeniowe. Od roku 2010 obowiązuje EUROKOD 7. Jego praktyczne wprowadzenie potrwa z pewnością jakiś czas, wypełniony dyskusją nawiązującą do norm obowiązujących dotychczas. W prezentowanym artykule podjęto taką próbę. Jej podstawą jest rozwiązanie odnoszące się do obiektu budowlanego posadowionego bezpośrednio zgodnie z normą PN-81/B-03020. W artykule porównano wymiary wybranych stóp i ławy fundamentowej budynku, zaprojektowanych według normy PN-81/B-03020 z obliczonymi według norm: PN-59/B-03020 i PN-EN-1997-1. Wyniki obliczeń nie różnią się istotnie. Mogłoby to oznaczać, że w przypadku niewielkich obiektów kubaturowych w obliczeniach inżynierskich analizowane normy dają podobne wyniki.

Słowa kluczowe: posadowienie bezpośrednie, projektowanie, norma, analiza.

1. Wprowadzenie

Sposób posadowienia obiektów oraz rodzaj przyjętych fundamentów a także ich wymiary uzależnione są zasadniczo od warunków gruntowo-wodnych podłoża i charakterystyki konstrukcyjnej obiektów. Poprawnie posadowiony obiekt wymaga spełnienia warunków nośności i użyteczności, a w ujęciu chronologicznie starszym – naprężeń dopuszczalnych i dopuszczalnych osiadań.

Rozwój wiedzy z zakresu geotechniki na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat przekłada się między innymi na zmiany w zakresie filozofii projektowania a także samego projektowania fundamentów. Potwierdzają to stosowne akty normatywne odnoszące się do fundamentów bezpośrednich i pośrednich a także różnych konstrukcji geotechnicznych. Od roku 2010 obowiązuje w kraju EUROKOD 7, reprezentujący pakiet norm odnoszących się do konstrukcji budowlanych. Proces „uczenia się” Eurokodu oraz praktycznego wdrożenia do praktyki projektowanej potrwa z pewnością jakiś czas, a towarzyszyć temu będą dyskusje i odniesienia do rozwiązań dotychczasowych. Te ostatnie mogą towarzyszyć ekspertom analizującym rozwiązania

istniejące w kontekście aktualnie obowiązujących wymagań Eurokodu 7.

W prezentowanym artykule podjęto taką próbę. Jakkolwiek jej podstawą jest pojedynczy obiekt budowlany to, zdaniem autorów, spostrzeżenia z przeprowadzonych obliczeń i analizy otrzymanych rozwiązań wydają się interesujące z inżynierskiego punktu widzenia.

2. Przegląd dotychczasowych norm krajowych

Jako pierwszą obowiązującą po II wojnie światowej w kraju wymieniają Wysokiński (2009), Wysokiński i in. (2011) normę z roku 1949 – PN/B-149 *Klasyfikacja gruntów ich bezpieczne obciążanie*, która zawierała wartości naprężeń dopuszczalnych dla określonych gruntów na stosunkowo ostrożnym poziomie. Norma z roku 1959, podobnie jak poprzednia, wykorzystywała naprężenia dopuszczalne podając te wartości dla różnych gruntów na poziomie 2 m (k_2), łącznie z propozycją ich przeliczenia na dowolnym poziomie posadowienia obiektu. Zawierała także propozycję, którą można by zaliczyć dzisiaj do stanów granicznych z deterministycznie zdefiniowanym współczynnikiem

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: jerzy.sekowski@polsl.pl

bezpieczeństwa. Normy: z roku 1981 i wcześniejsza z roku 1974, podobnie jak poprzednia typu nakazowego, była już normą stanów granicznych (stan nośności i użyteczności), wykorzystującą w obliczeniach projektowych parametry charakterystyczne i obliczeniowe. W Eurokodzie 7, wykorzystującym również filozofię stanów granicznych i teorię niezawodności, podstawą obliczeń są zasadniczo parametry określone w badaniach a projektant posiada większą swobodę w zakresie ich prowadzenia.

Wysokiński i in. (2011) bardzo szeroko przybliżają zasady Eurokodu 7, jak również praktyczny sposób jego stosowania przy projektowaniu fundamentów bezpośrednich i pośrednich oraz konstrukcji oporowych, a także w analizie stateczności skarp i zboczy

3. Przedstawienie problemu

Budynek szkolny, będący przedmiotem artykułu, został wykonany w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Podstawę do przyjętego posadowienia była obowiązująca wówczas norma PN-81/B-03020 *Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie*. Zachowały się: dokumentacja techniczna obiektu i opinia geotechniczna, zawierająca wyniki badań podłoża gruntowego i wartości parametrów geotechnicznych. Brak jest natomiast obliczeń fundamentów obiektu.

Sytuacja powyższa stanowiła punkt wyjścia dla szerszej analizy przyjętego posadowienia, której podstawą były akty wybrane normatywne obowiązujące w kraju po II wojnie światowej, to jest normy: PN-59/B-03020 *Grunty budowlane. Wytyczne wyznaczania dopuszczalnych obciążeń jednostkowych*, PN-81/B-03020 i PN-EN-1997-1 *Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne*.

Celem prezentowanego artykułu jest ocena, z punktu widzenia projektanta, posadowienia istniejącego budynku w ujęciu wspomnianych powyżej norm.

4. Charakterystyka obiektu i przyjętego posadowienia

Budynek szkolny to obiekt dwukondygnacyjny wysokości 7,5 m o ścianowym i płytowo-słupowym ustroju nośnym i wymiarach w rzucie: 19,85 m × 25,40 m. Posadowiono go bezpośrednio na ławach i stopach fundamentowych (rys. 1).

5. Warunki gruntowo-wodne

Teren zabudowy został rozpoznany do głębokości 5 m ppt. Badania laboratoryjne wiodących parametrów geotechnicznych wykonano zgodnie z obowiązującą wówczas normą PN-88/B-04481 *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*, pozostałe ustalono metodą B.

Podłoże gruntowe do rozpoznanej głębokości budują utwory czwartorzędowe, reprezentowane przez grunty mało i średnio spoiste w stanie twardoplastycznym oraz w stanie plastycznym. Powierzchniowo cały teren pokrywa warstwa gleby (lokalnie nasypów) o miąższości do około 0,8 m. W podłożu do rozpoznanej wierceniami głębokości nie nawiercono wody gruntowej. Wyróżniono w nim, pomijając przypowierzchniowe nasypy i glebę, dwie warstwy geotechniczne, a mianowicie warstwę IIa – obejmującą grunty mało i średnio spoiste (pyły, gliny pylaste), w stanie twardoplastycznym ($I_L = 0,19$) oraz warstwę IIb – obejmującą podobne rodzajowo grunty, lecz w stanie plastycznym ($I_L = 0,36$). Te ostatnie mają niewielką miąższość (od 0,4 m do 1,1 m) i występują w części środkowej podłoża, przedzielając wspomniane powyżej grunty warstwy IIa.

W tablicy 1 zestawiono wartości charakterystyczne parametrów geotechnicznych przyjęte dla poszczególnych warstw metodą B z normy PN-81/B-03020 dla parametrów wiodących (I_L) natomiast w tablicy 2 parametry obliczeniowe, wyznaczone dla $\gamma_m = 0,9$.

Na rysunku 2 przedstawiono wybrany przekrój geotechniczny, z najpłycej (2,0 m ppt.) występującą warstwą IIb.

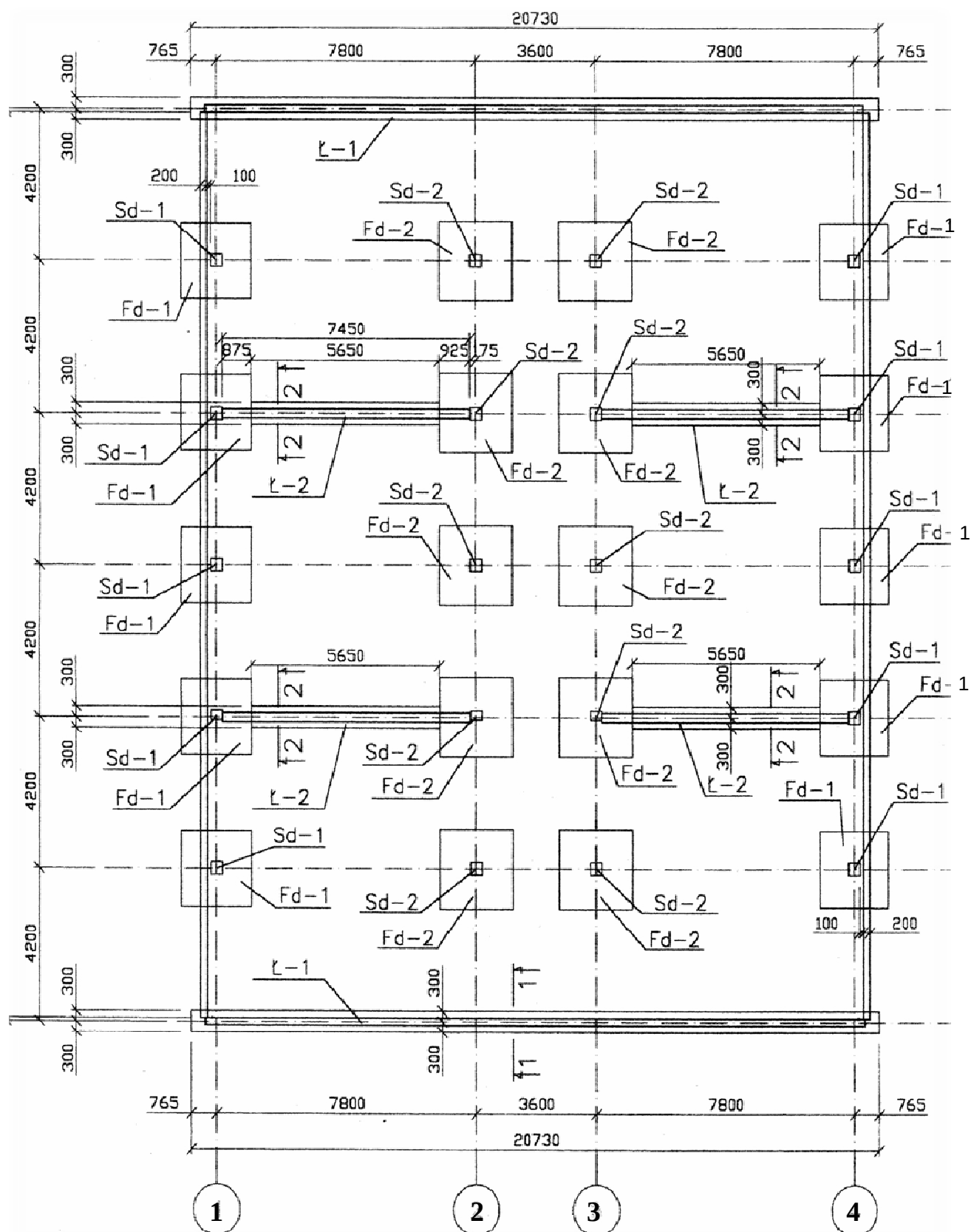
Tab. 1. Zestawienie parametrów charakterystycznych $X(n)$

Rodzaj gruntu	Stan gruntu I_L	Ciężar objętościowy $\gamma^{(n)}$	Spójność $c_u^{(n)}$	Kąt tarcia wewnętrznego $\phi_u^{(n)}$	Moduł ściśliwości $M_0^{(n)}$	Moduł ściśliwości $M^{(n)}$
	[1]	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]
II a	0,19	21,0	16,0	15,0	30,0	50,0
II b	0,36	20,0	13,0	12,5	21,0	35,0

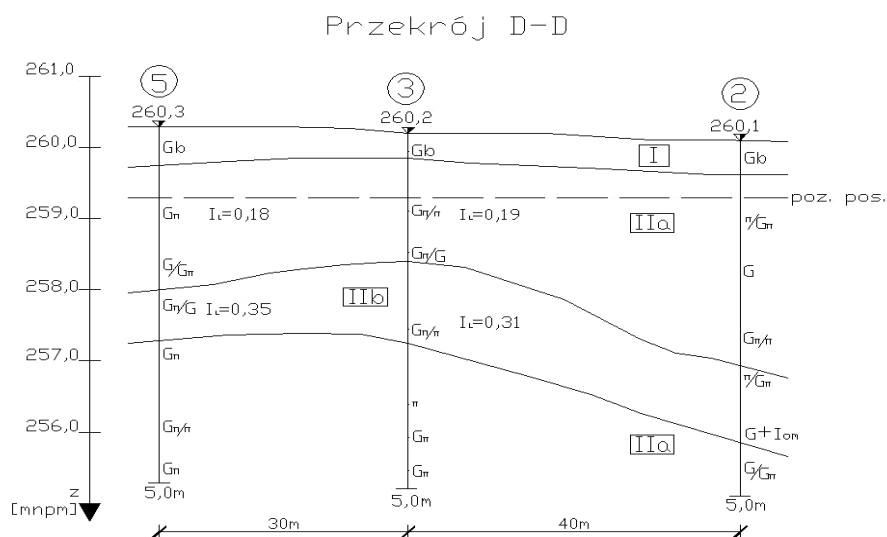
Tab. 2. Zestawienie parametrów obliczeniowych $X^{(r)} = X^{(n)} \cdot \gamma_m$

Rodzaj gruntu	Ciężar objętościowy $\gamma^{(r)}$	Spójność $c_u^{(r)}$	Kąt tarcia wewnętrznego $\phi_u^{(r)}$	Współczynniki nośności *		
				N_D	N_C	N_B
	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[1]	[1]	[1]
II a	18,9	14,4	13,5	3,43	10,09	0,44
II b	18,0	11,7	11,25	2,63	8,41	0,24

* współczynniki nośności (N_D , N_C , N_B) wyznaczono za PN-81/B-03020



Rys. 1. Rzut fundamentów



Rys. 2. Wybrany przekrój geotechniczny

Projektant posadził budynek szkolny bezpośrednio na poziomie $D = 1,0$ m ppt. Zaprojektowane fundamenty miały następujące wymiary:

- stopa skrajna $B \times L \times H = 1,2 \times 1,8 \times 0,4$ m,
- stopa środkowa $B \times L \times H = 1,4 \times 2,1 \times 0,4$ m,
- ława skrajna $B \times H = 0,6 \times 0,3$ m.

6. Przyjęte fundamenty w świetle norm krajowych

6.1. Założenia

Autorzy, wobec braku odpowiednich obliczeń, wykorzystując parametry geotechniczne zestawione w tablicy 1 i 2, sprawdzili (według normy PN-81/B-03020) przyjęte przez projektanta wymiary trzech wybranych fundamentów (ława skrajna, stopa skrajna i stopa środkowa – rysunek 2) a także obliczyli ich osiadania. Te same fundamenty zostały następnie zaprojektowane według PN-59/B-03020 i PN-EN-1997-1, dla obciążeń zestawionych według odpowiednio obowiązujących norm obciążeń: PN-60/B-02009 *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenia stałe i użytkowe* i PN-EN-1991-1-1 *Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach*, PN-EN-1991-1-3 *Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem*, PN-EN-1991-1-4 *Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru*. Warunek nośności (naprężen dopuszczalnych)

sprawdzano dla poziomu posadowienia i stropu warstwy IIb, decydującej de facto o ich spełnieniu.

Dla uproszczenia, w nawiązaniu do fundamentów istniejących, przyjęto przekrój prostokątny dla ławy i stóp odpowiednio o wysokości 0,3 m i 0,4 m. Osiadania poszczególnych fundamentów określano metodą naprężeń do poziomu strefy aktywnej.

6.2. Posadowienie bezpośrednie w ujęciu normy PN-81/B-03020

Warunek nośności (I SG) sprawdzano porównując opór obliczeniowy podłoża gruntowego (Q_{fB}) z obciążeniem obliczeniowym (Q_r) w poziomie posadowienia i w poziomie stropu warstwy podścielającej dla fundamentu odpowiednio o szerokości B i szerokości zastępczej B' . Dla poszczególnych fundamentów określony został stopień wykorzystania nośności podłoża gruntowego

6.3. Posadowienie bezpośrednie w ujęciu normy PN-59/B-03020

Wymiary poszczególnych fundamentów dobrano metodą II, odczytując z tablicy 2 normy PN-59/B-03020 wartości naprężeń dopuszczalnych na poziomie 2 m (k_2) dla kolejnych gruntów a następnie sprawdzając warunki normowe w poziomie posadowienia i stropie warstwy podścielającej.

Parametry geotechniczne dla potrzeb stosownych obliczeń przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Zestawienie parametrów charakterystycznych

Rodzaj gruntu	Stan gruntu Sp [1]	Ciężar objętościowy γ_0 [kN/m ³]	Spójność c [kPa]	Kąt tarcia wewnętrznego φ [°]	Moduł ściśliwości E' [MPa]	Moduł ściśliwości E'' [MPa]
II a	0,19	21,0	16,0	15,0	30,0	50,0
II b	0,36	20,0	13,0	12,5	21,0	35,0

6.4. Posadowienie bezpośrednie w ujęciu normy PN-EN-1997-1 (Eurokod 7)

Wymiarowanie fundamentu wykonano zgodnie z założeniami podejścia obliczeniowego 2* według kombinacji A1 + M1 + R2.

Współczynniki częściowe do sprawdzenia stanów granicznych nośności odczytano z normy PN-EN-1997-1, załącznik A. Nośność obliczeniową wyznaczono dla warunków gruntowych z odpływem.

Parametry geotechniczne przyjęte do obliczeń zestawiono w tabeli 4 (parametry charakterystyczne) oraz w tabeli 5 (parametry obliczeniowe).

Współczynniki częściowe: γ_g , γ_c , γ_ϕ przyjęto z tablicy A4 za PN-EN-1997-1 równe 1,0

Obciążenia zestawiono zgodnie z normą PN-EN-1991-1 i PN-EN-1991-1-4. Kombinacje wykonano w programie Autodesk Robot Structural Analysis 2011 Profesional.

Zdefiniowano 4 typy obciążenia: ciężar własny (obciążenia stropu), ciężar użytkowy, obciążenie wiatrem i śniegiem (obciążenia zmienne). Wykonane zostały 2 kombinacje obciążeń: kombinacja SGN (do sprawdzenia nośności fundamentu i wyliczenia zbrojenia) oraz SGU (do sprawdzenia stanu granicznego użytkowania).

6.5. Zestawienie otrzymanych wyników

Wyniki, obejmujące wymiary fundamentów ($B \times L$) i ich powierzchnię (A) oraz procent wykorzystanej nośności (naprężeń dopuszczalnych) a także osiadania poszczególnych fundamentów, otrzymane z obliczeń przeprowadzonych zgodnie z normami: PN-59/B-03020, PN-81/B-03020 oraz PN-EN-1997-1 zestawiono w tablicach 6, 7 i 8.

Tab. 4. Zestawienie parametrów charakterystycznych

Rodzaj gruntu	Stan gruntu I_L [1]	Ciężar objętościowy γ_k [kN/m ³]	Spójność c_k [kPa]	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_k [°]	Moduł ściśliwości M_0 [MPa]	Moduł ściśliwości M [MPa]
II a	0,19	21,0	16,0	15,0	30,0	50,0
II b	0,36	20,0	13,0	12,5	21,0	35,0

Tab. 5. Zestawienie parametrów obliczeniowych

Parametry	γ_d kN/m ³	ϕ_d' [°]	c_d' kPa
II a	21	15	16
II b	20	12,5	13

Tab. 6. Zestawienie wyników dla stopy skrajnej

Kategoria	PN-59/B-03020	PN-81/B-03020	PN-EN 1997-1
Wymiary fundamentu [m]	$B \times L = 1,4 \times 2,1$ $h_f = 0,4$	$B \times L = 1,2 \times 1,8$ $H = 0,4$	$B \times L = 1,3 \times 2,0$ $d_f = 0,4$
Wykorzystanie nośności [%]	99,6	88	98,5
Osiadania [mm]	$s = 5,96$	$s = 5,94$	$s = 4,84$

Tab. 7. Zestawienie wyników dla stopy środkowej

Kategoria	PN-59/B-03020	PN-81/B-03020	PN-EN 1997-1
Wymiary fundamentu [m]	$B \times L = 1,6 \times 2,4$ $h_f = 0,4$	$B \times L = 1,4 \times 2,1$ $H = 0,4$	$B \times L = 1,6 \times 2,4$ $d_f = 0,5$
Wykorzystanie nośności [%]	96,0	92,0	99,0
Osiadania [mm]	$s = 6,76$	$s = 7,42$	$s = 6,00$

Tab. 8. Zestawienie wyników dla ławy fundamentowej

Kategoria	PN-59/B-03020	PN-81/B-03020	PN-EN 1997-1
Wymiary fundamentu [m]	B = 0,6 h _f = 0,3	B = 0,6 H = 0,3	B = 0,7 d _f = 0,3
Wykorzystanie nośności [%]	45,0	31,0	69,5
Osiadania [mm]	s = 2,06	s = 1,79	s = 2,28

7. Podsumowanie

Obowiązujące w kraju na przestrzeni minionych lat normy projektowania fundamentów bezpośrednich: PN-59/B-03020, PN-81/B-03020, zastąpiono w roku 2010 normą PN-EN-1997-1 (Eurokod 7). Normy powyższe różni między innymi filozofia podejścia do obliczeń. Pierwsza z ich (PN-59/B-03020) opierała się na wyznaczaniu naprężeń dopuszczalnych w gruncie oraz sprawdzeniu wielkości spodziewanych osiadań. Norma PN-81/B-03020 (rozwiniecie normy PN-74/B-03020) wprowadziła stany graniczne: stan graniczny nośności oraz stan graniczny użytkowalności. Norma PN-EN-1997-1, opiera się również na sprawdzeniu stanów granicznych, według jednej z czterech metod projektowych oraz jednego z trzech podejść obliczeniowych. Norma ta, podając ogólne zasady projektowania, odsyła projektanta do załączników krajowych oraz innych przepisów szczegółowych.

Uzyskane z obliczeń wymiary stóp skrajnych oscylują w granicach: 1,2-1,4 × 1,8-2,1 m, stóp środkowych 1,4-1,6 × 2,1-2,4 m oraz ławy 0,6-0,7 m, a osiadania fundamentów różniły się nieznacznie (około 0,3-0,5 mm). Można zatem uznać, że w przypadku analizowanego obiektu kubaturowego, zaliczonego do I kategorii geotechnicznej, wymiary fundamentów jakie uzyskano przy zbliżonym poziomie wykorzystania nośności podłoża i porównywalnych osiadaniach były podobne, jakkolwiek norma PN-81/B-03020 wydaje się być nieco „odważniejsza” od pozostałych

Literatura

- Wysokiński L. (2009). Projektowanie geotechniczne. Od klasyfikacji gruntów do monitoringu obiektu według norm europejskich. *Geoinżynieria*, 2/2009, 26-46.
- Wysokiński L., Kotlicki W., Godlewski T. (2011). Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7. Poradnik. ITB, Warszawa.

SCHOOL BUILDING FOUNDATION ACCORDING TO POLISH STANDARDS: PN-59/B-03020, PN-81/B-03020 AND PN-EN-1997-1

Abstract: A correctly founded structure needs to meet the ultimate limit states and the serviceability limit states (the limit states of allowed stress and allowed settlements). The knowledge on broadly defined geotechnics has developed, recently. Changes in design standards for the mentioned foundations were one of its consequences. In the last sixty years, the standards changed few times in Poland. Not only their philosophy was different, but also the calculation procedure. Since 2010, the Eurocode 7 has been currently applicable. In practice, its introduction will certainly take some time and the discussion concerning the former standards will take place. The presented paper is an attempt to take part in that discussion. It is based on the solution adopted for a structure with shallow foundation according to the PN-81/B-03020 standard. The paper presents the comparison between sizes of chosen pad foundations, as well as the strip foundation of the building, designed according to the PN-81/B-03020 standard and calculated according to the PN-59/B-03020 and PN-EN-1997-1 standards. There is no significant difference between the results. It may mean that, in the case of small buildings, the analysed standards give similar results in engineering calculations.

GLEBOKIE POSADOWIENIA BUDYNKÓW I METODY ICH ANALIZY STATYCZNEJ

Damian SIWIK*, Czesław MIEDZIAŁOWSKI

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

Streszczenie: W pracy przedstawiono sposoby realizacji i metody obliczeń statycznych wykopów i konstrukcji w przypadku głębokich posadowień budynków. Przedstawiono aktualnie stosowane metody oraz rysujące się kierunki ich dalszego rozwoju preferując metodę elementów skończonych. Wskazano na podawane przez badaczy trudności i problemy w trakcie realizacji analiz obliczeniowych oraz braki w zakresie kompletności modeli w odniesieniu do faz realizacji inwestycji. Przedstawiono własny przykład obliczeniowy wpływu głębokiego posadowienia budynku w poszczególnych fazach realizacji na stan przemieszczeniowo-naprężeniowy podłoża gruntowego i budynku w sąsiedztwie.

Słowa kluczowe: głębokie wykopy, głębokie posadowienia budynków, sąsiednia zabudowa, metody obliczeniowe, modele 3D i śledzące.

1. Wprowadzenie

Problematyka głębokich wykopów jest ważna w procesie projektowania i realizacji obiektów budowlanych z uwagi na znaczącą ingerencję w podłoże gruntowe i wpływ na zabudowę sąsiednią (Siemińska-Lewandowska, 2001, 2010; Szulborski i in., 2009).

Odształcalność podłoża gruntowego w formie wypiętrzeń lub osiadań wpływa na stan przemieszczeniowo-naprężeniowy obiektów (Michalak, 2009). Są to procesy wzajemnie zależne, czyli interakcyjne: podłoże gruntowe – „nowy” budynek – zabudowa istniejąca.

W artykule zostaną omówione sposoby realizacji i obliczenia obudowy głębokich wykopów, wykonawstwa głębokich posadowień oraz głównie modele do analizy statycznej wpływu głębokich posadowień na otoczenie wraz z podaniem pożądanych kierunków dalszych badań. Głębokie posadowienia budynków stosowane są zazwyczaj gdy istnieje konieczność przeniesienia znacznych obciążeń projektowych na nośne warstwy gruntu (budynki wysokie) lub gdy wymaga tego rodzaj realizowanego obiektu (podziemia budynków użyteczności publicznej, podziemne garaże i parkingi).

Głębokie wykopy są to realizacje o głębokości powyżej 3m, o ścianach pionowych zabezpieczonych obudową wykonaną w jednej z następujących technologii: ściana szczelinowa, obudowa berlińska, ściana z grodzic stalowych, palisada z pali lub mikropali, ściana z kolumn

wykonanych metodą iniekcji strumieniowej, ściana gwoździowana (Siemińska-Lewandowska, 2010). Jak podaje Michalak (2008) w procesie realizacji głębokich posadowień można wyróżnić następujące etapy realizacji: wykonanie obudowy wykopu, głębienie wykopu wraz z sukcesywnym podpieraniem jego ścian, obniżenie zwierciadła wody gruntowej, wykonanie konstrukcji części podziemnej budynku, wykonanie konstrukcji nadziemnej, rozpoczęcie eksploatacji budynku.

Jak wynika z analiz przeprowadzonych przez Szulborskiego i in. (2009), największy wpływ na wartości osiadań terenu przyległego do realizowanego wykopu mają: rodzaj podłoża gruntowego i zastosowanej obudowy, schemat statyczny ścian oraz technologia realizacji prac ziemnych i budowlanych w wykopie.

2. Metody realizacji głębokich wykopów

Wybór technologii obudowy wykopu oraz sposobów prowadzenia prac w wykopie zależy od wielu czynników, między innymi: od rodzaju gruntów, głębokości zalegania zwierciadła wód gruntowych oraz od zurbanizowania terenu w sąsiedztwie inwestycji.

Najczęściej stosowanymi technologiami zabezpieczenia ścian wykopu są: ściany szczelinowe, obudowa berlińska, ściany z grodzic stalowych (tak zwana ścianka szczelna).

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: d.siwik@pb.edu.pl

Ściana szczelinowa (rys. 1) wykonywana jest w technologii monolitycznej z betonu lub żelbetu. Beton tłoczony jest do wcześniej wykonanej szczeliny przez rurę wlewową pod osłoną cieczy bentonitowej lub polimerowej. Grubość ściany wynika z obliczeń statycznych, a także jest podyktowana szerokością chwyta.



Rys. 1. Zastosowanie metody stropowej przy budowie obiektu biurowo-usługowego w Warszawie (www.geotekst.pl)

Obudowę berlińską (rys. 2) i ściankę szczelną zaliczyć można do konstrukcji wiotkich. Ze względu na dość duże przemieszczenia poziome od gruntu zalegającego za obudową, rozwiązania te wymagają dodatkowych wzmocnień w postaci rozpór lub kotew gruntowych.



Rys. 2. Budowa Szybki Tramwaj w Krakowie – zastosowanie technologii obudowy berlińskiej (www.fundamenty.com.pl)

Z uwagi na niewielki wymiar poprzeczny ściany obudowy wykopu, jej sztywność na zginanie jest stosunkowo nieduża. Konieczne jest więc zastosowanie odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych, dla zapewnienia stateczności i ograniczenia przemieszczeń obudowy (polepszenie schematu statycznego).

Do najbardziej rozpowszechnionych rozwiązań usztywniających ściany wykopu, zalicza się: wykop w obudowie wzmocnionej rozpórami, wykop w obudowie kotwionej, metodę stropową (metoda stropowa klasyczna, metoda półstropowa, metoda „top&down”).

Miejsca podparcia obudowy wykopu, w przypadku technologii rozporowej i kotwionej wynikają bezpośrednio z analiz statycznych. Dodatkowo, przy wykopach w obudowie kotwionej, na etapie projektowania należy uwzględnić obniżenie zwierciadła wód gruntowych.

Metoda stropowa (rys. 1) i jej odmiany wykorzystywane są najczęściej w przypadku, gdy istnieje duże niebezpieczeństwo niekorzystnego oddziaływania wykopu na sąsiednią zabudowę. Stosowana jest wyłącznie w połączeniu z technologią ściany szczelinowej. Obudowa, w tym przypadku podparta jest sztywnymi tarczami poziomymi (stropy kondygnacji podziemnej).

Bardziej obszerny opis technologii wykonywania głębokich wykopów wraz fazowaniem robót oraz przykładami ich zastosowania znaleźć można w pracach, między innymi, Terlikowskiego i Dłużewskiego (2001) oraz Siemińskiej-Lewandowskiej (2010).

3. Metody analizy statycznej

Metody stosowane do analizy statycznej głębokich posadowień podzielić można na trzy podstawowe grupy: metody służące do obliczania przemieszczeń i sił wewnętrznych w ścianie obudowy wykopu (metoda klasyczna, metoda modułu reakcji podłoża), metody analityczne służące do szacowania krzywej deformacji podłoża za ścianą obudowy wykopu, metody numeryczne (głównie metoda elementów skończonych), służące do kompleksowej analizy realizowanej inwestycji.

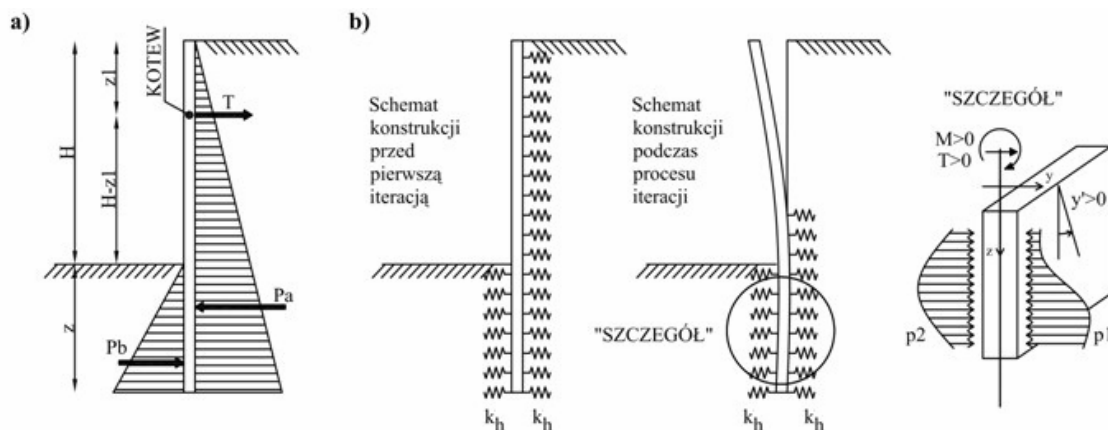
3.1. Metody obliczania przemieszczeń i sił wewnętrznych w ścianie obudowy wykopu

Metoda klasyczna (Siemińska-Lewandowska, 2010) opracowana została przez Pecka w 1969 roku (rys. 3a). Jako schemat statyczny ściany w metodzie tej, przyjmuje się ustrój prętowy obciążony parciem i odporem gruntu oraz siłami skupionymi reprezentującymi oddziaływanie kotew, rozpór lub stropów.

Metoda modułu reakcji podłoża (Siemińska-Lewandowska, 2010) sformułowana została przez Balaya w 1985 roku (rys. 3b). Metoda ta uwzględnia nieliniowe zachowanie gruntu oraz jego współpracę z obudową wykopu, poprzez zastosowanie iteracyjnego rozwiązywania równania równowagi. Jako model gruntu przyjmuje się model podłoża Winklera, którego oddziaływanie na ścianę wykopu można zastąpić układem sprężyn o sztywności k_h . Jako schemat statyczny ściany przyjmuje się belkę statycznie niewyznaczalną obciążoną parciem ośrodka i nieznaną reakcją podłoża gruntowego.

Równowaga jednostkowego elementu ściany (rys. 3b) na głębokości, opisana jest równaniem:

$$\frac{d^2}{dz^2} \left(EJ(z) \frac{d^2 y}{dz^2} \right) + p_2(z) = p_1(z) + p_h(z) \quad (1)$$



Rys. 3. Model obliczeniowy ściany wykopu (Siemińska-Lewandowska, 2010): a) metoda klasyczna (rozkład parcia i odporu), b) metoda modułu reakcji podłoża

gdzie: $EJ(z)$ jest sztywnością ściany na zginanie, $p_1(z)$, $p_2(z)$ są poziomym parciem gruntu po jednej oraz po drugiej stronie ściany, a $p_h(z)$ jest różnicą parć hydrostatycznych.

Rozwiązaniem ogólnym równania (1) jest funkcja przemieszczeń obudowy wykopu $y(z)$, dla której warunki brzegowe sformułowane są w postaci: $y(z = 0) \neq 0$ oraz $y(z = h) = 0$.

Metoda ta pozwala na wyznaczenie przemieszczeń i sił wewnętrznych w ścianie, na każdym etapie realizacji wykopu. Istnieje także możliwość zamodelowania kotew grunтовых, rozpór oraz stropów podpierających obudowę wykopu.

3.2. Metody analityczne służące do szacowania krzywej deformacji podłoża za ścianą obudowy wykopu

Metoda L. C. Jen do wyznaczania deformacji powierzchni osiadań gruntu za ścianą wykopu, bez uwzględnienia obciążenia naziomu (Jen, 1998) bazuje na zależnościach wyprowadzonych na podstawie analiz numerycznych i doświadczalnych, prowadzonych w okolicach Bostonu. Analizy numeryczne przeprowadzone zostały z wykorzystaniem systemu ABAQUS, bazującego na metodzie elementów skończonych. Podaną metodę opracowano dla gruntów gliniastych przyjmując, że wykop zabezpieczony jest ścianą o szerokości 0,9 m podpartą sztywnymi rozporami poziomymi co 2,5 m. Dla wykopów zabezpieczonych ścianą o innej szerokości,

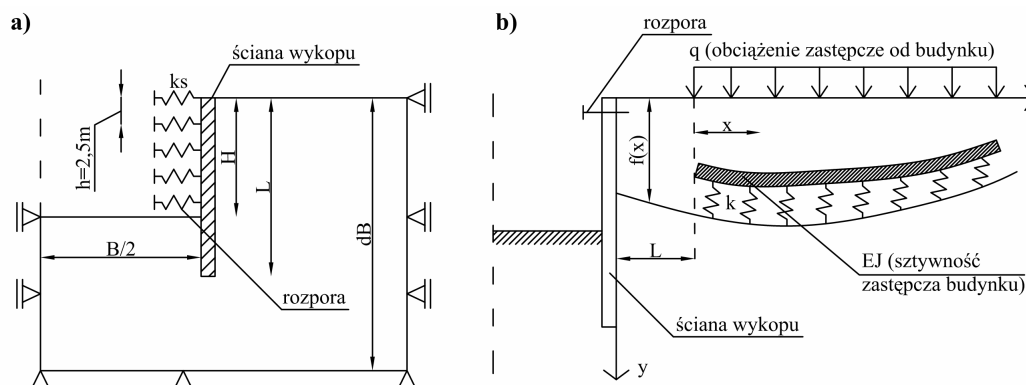
podpartą rozporami podatnymi należy zastosować współczynniki korekcyjne. Model do obliczania osiadań za ścianą wykopu przedstawiono na rysunku 4a.

Dla wykopów głębszych niż 7,5m przemieszczenia pionowe warstw podłoża gruntowego za ścianą wykopu δ_v [cm] opisuje wzór:

$$\delta_v = \delta_{v\max} \frac{\left(e^{ax^2+bx} \right) \left(1 + x^2 \right)^c}{\left(e^{ax_{\max}^2+bx_{\max}} \right) \left(1 + x_{\max}^2 \right)^c} \quad (2)$$

gdzie: $x_{\max}$ jest odległością od ściany wykopu, przy której występują maksymalne osiadań w m, $\delta_{v\max} = \lambda \omega \delta_{v\max}^*$ jest maksymalną wartością osiadań gruntu za ścianą wykopu w cm, $\delta_{v\max}^*$ oraz μ , λ , π , ω są współczynnikami wyznaczanymi z odpowiednich procedur podanych przez Jena (1998), natomiast a , b , c są współczynnikami odczytywanymi bezpośrednio z wykresów opracowanych przez autorkę.

Metoda V. A. Il'icheva do wyznaczania deformacji powierzchni osiadań gruntu za ścianą wykopu, z uwzględnieniem obciążenia naziomu i sztywności budynku (Il'ichev i in., 2006) bazuje na modelu belki sprężystej na podłożu gruntowym Winklera oraz zależnościach wyprowadzonych na podstawie badań doświadczalnych przez Hannika i innych w 2003 roku (rys. 4b).



Rys. 4. Model obliczeniowy krzywej osiadań za ścianą wykopu: a) metoda L. C. Jen (1998), b) metoda V. A. Il'icheva (Il'icheva, 2006) – belka na podłożu sprężystym w pobliżu głębokiego wykopu

Funkcję opisującą osiadanie budynku za ścianą wykopu wyraża krzywa spełniająca równanie:

$$EJ \frac{\partial^4 y(x)}{\partial x^4} + ky(x) = q + k f_1 H_k e^{-\frac{\alpha}{H_k}(x+L)} \quad (3)$$

gdzie: H_k jest głębokością wykopu w m, α oraz f_1 są współczynnikami, odpowiednio: $\alpha = 0,7552$, $f_1 = (01-10,1)\% H_k$, EJ jest sztywnością zastępczą budynku na zginanie w kNm^2/m , $w(x)$ jest ugięciem belki, o sztywności EJ na podłożu Winklera, spowodowanym równomiernie rozłożonym obciążeniem zastępczym q w m, k jest współczynnikiem sprężystego osiadania belki, charakteryzującym grunt w kN/m^3 , a q jest obciążeniem zastępczym od budynku w kN/m .

Metoda Michalak do wyznaczania przemieszczeń pionowych powierzchni terenu w sąsiedztwie nowo wznoszonych budynków (Michalak, 2009) opracowana została na podstawie pomierzonych wartości przemieszczeń pionowych oraz metody odkształceń trójosiowych gruntu (metoda analogu sprężystego) z wykorzystaniem programu GEO4.

Funkcje określające przemieszczenia terenu, dla podłoża uwarstwionego (sumowanie po i) w sąsiedztwie nowo wznoszonych budynków głęboko posadowionych, zapisać można w postaci:

- dla wykopów realizowanych w podłożu niejednorodnym, gdy pod fundamentem budynku zalegają grunty piaszczyste:

$$V(x) = \left(-0,00883 \frac{x^2}{h^2} + 0,0482 \frac{x}{h} - 0,0655 \right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{q^* \Delta \omega_i B (1 - v_i^2)}{E_{0i}} \quad (4)$$

- dla wykopów realizowanych w podłożu niejednorodnym, gdy pod fundamentem budynku zalegają grunty ilaste:

$$V(x) = \left(-0,00614 \frac{x^2}{h^2} + 0,0454 \frac{x}{h} - 0,0652 \right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{q^* \Delta \omega_i B (1 - v_i^2)}{E_{0i}} \quad (5)$$

gdzie: x jest odległością od ściany wykopu, h jest głębokością wykopu, q^* jest ciężarem budynku, zmniejszonym o wartość obciążenia od części podziemnej, ω jest współczynnikiem zależnym od kształtu i sztywności fundamentu, B jest szerokością fundamentu nowo wznoszonego budynku, a E_0 jest modułem odkształcenia pierwotnego gruntu, v jest współczynnikiem Poissona gruntu.

3.3. Metody numeryczne

Z zakresu metod numerycznych wyróżnić można metodę różnic skończonych, metodę elementów brzegowych i metodę elementów skończonych. Największe

zastosowanie spośród podanych metod znalazła metoda elementów skończonych (MES), którą inżynierowie i naukowcy z różnych dziedzin nauki wykorzystują do analizy wielu zagadnień praktycznych i teoretycznych.

Ze względu na rozwój w ostatnich latach podstaw teoretycznych w dziedzinie teorii sprężystości i plastyczności, równań konstytutywnych i modeli ośrodków gruntowych, MES może być stosowana z powodzeniem w analizie głębokich wykopów. Jej główne zalety (Siemińska-Lewandowska, 2010) to możliwość: określenia stanu naprężenia i odkształcenia oraz wyznaczenia pola przemieszczeń w dowolny punkcie zamodelowanego obszaru, uwzględnienia w obliczeniach przepływu wody, temperatury oraz oddziaływań dynamicznych, uwzględnienia złożonych warunków geotechnicznych, analizy zagadnienia przestrzennego (3D) i płaskiego (2D) w zakresie sprężystym oraz uwzględnienia zależności nieliniowych, analizy statycznej całego wykopu wraz z przyległym terenem i sąsiadującą zabudową z uwzględnieniem technologii realizacji inwestycji.

Konieczność określenia parametrów gruntowych oraz dobór odpowiedniego modelu ośrodka gruntowego powodują pewne niedogodności przy stosowaniu metody elementów skończonych w zagadnieniach geotechnicznych. Parametry ośrodka powinny być przy tym wyznaczone we wszystkich analizowanych fazach pracy i przyjmowane do obliczeń jako wartości charakterystyczne, zweryfikowane na podstawie analiz wstecz, przeprowadzonych na podstawie obserwacji osiadań realizowanej inwestycji (Siemińska-Lewandowska, 2001, 2010; Kłosiński, 2010; Truty, 2009).

Sformułowanie zagadnienia metodą elementów skończonych prowadzi do macierzowego układu równań, w postaci $K \cdot d = F$. Ze względu na zmienny charakter procesu (etapowanie wykopu i zabudowy) oraz uwzględnienie w obliczeniach numerycznych problemów hydraulicznych i wszelkiego rodzaju nieliniowości najczęściej powyższe równanie zapisuje się w postaci przyrostowej:

$$K \cdot \Delta d = \Delta F \quad (6)$$

gdzie: K jest macierzą sztywności, Δd jest wektorem niewiadomych przemieszczeń węzłowych w zapisie przyrostowym, natomiast ΔF jest wektorem obciążeń węzłowych w postaci przyrostowej.

Równanie (6) zapisać można w postaci macierzowego układu równań (Bentler, 1998):

$$\begin{bmatrix} K & K_v^T \\ K_v & \Delta t \cdot K_h \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta d \\ \{\gamma_w h\}_{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{t+\Delta t} - F_t + K_v^T \cdot \{\gamma_w h\}_t \\ \Delta t \cdot (Q_{t+\Delta t} - Q_t) - \Delta t \cdot (1 - \theta) \cdot K_h \cdot \{\gamma_w h\}_t \end{bmatrix} \quad (7)$$

gdzie: K_v jest macierzą sprzężoną, K_h jest macierzą filtracji (przepuszczania), Q jest wektorem przepływu, $\{\gamma_w h\}$ jest wektorem naporu hydrodynamicznego płynu.

Pierwszy wiersz macierzowego układu równań (7) dotyczy zmiany sił wewnętrznych (siły powstałe od naprężeń rzeczywistych oraz naprężeń związanych z ciśnieniem porowym) spowodowanej zmianą sił zewnętrznych w określonym przedziale czasu. Drugi wiersz macierzowego układu równań (7) związany jest z filtracją wody.

Dodatkowo w przypadku głębokich wykopów konieczne jest zastosowanie odpowiedniej procedury symulującej proces technologiczny prowadzenia robót na budowie (Nogueira i in., 2009): model według Browna i Bookera z 1985 roku, model według Nogueiry z 1998 roku. Modele te pozwalają między innymi na uwzględnienia w obliczeniach numerycznych zjawiska odprężenia dna wykopu.

Stosowane programy komputerowe, bazujące na metodzie elementów skończonych wykorzystywane do analizy głębokich posadowień to między innymi: specjalistyczne programy do zagadnień geotechnicznych (Z_Soil, GEO 4, GEO 5, MIDAS, PLAXIS, STAGE CRISP, HYDRO-GEO); systemy metody elementów skończonych: ABAQUS, ANSYS.

Programy MES, dla geotechniki zastosowane zostały między innymi w pracach: Bentlera (1998), Siemińskiej-Lewandowskiej (2001), Sorbjana i in. (2001), Gaszyńskiego i Poślajko (2003), Barańskiego i in. (2007), Michalak (2009).

Systemu ABAQUS użyto w pracy Oka i in. (2008), wykorzystując: metodę Browna i Bookera do symulacji wykopu oraz kryterium Coulomba-Mohra do zamodelowania ośrodka gruntowego. Systemu ANSYS użyto

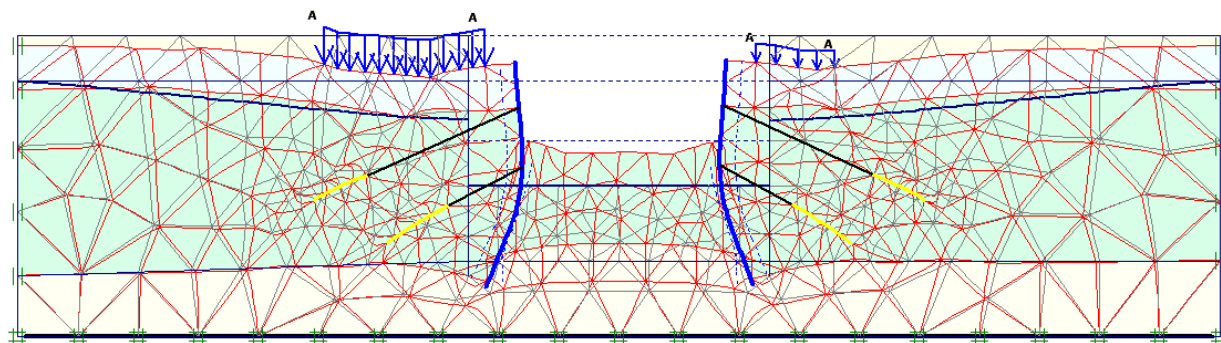
między innymi w pracach Qionga i in. (2006) oraz Weimina i Liminga (2011).

W systemie ANSYS, do symulacji wykopu wykorzystywane są często tak zwane elementy skończone „birth and death”. Dodatkowo ANSYS CivilFEM pozwala na analizę zagadnień związanych ściśle z budownictwem, między innymi zagadnień geoinżynierskich.

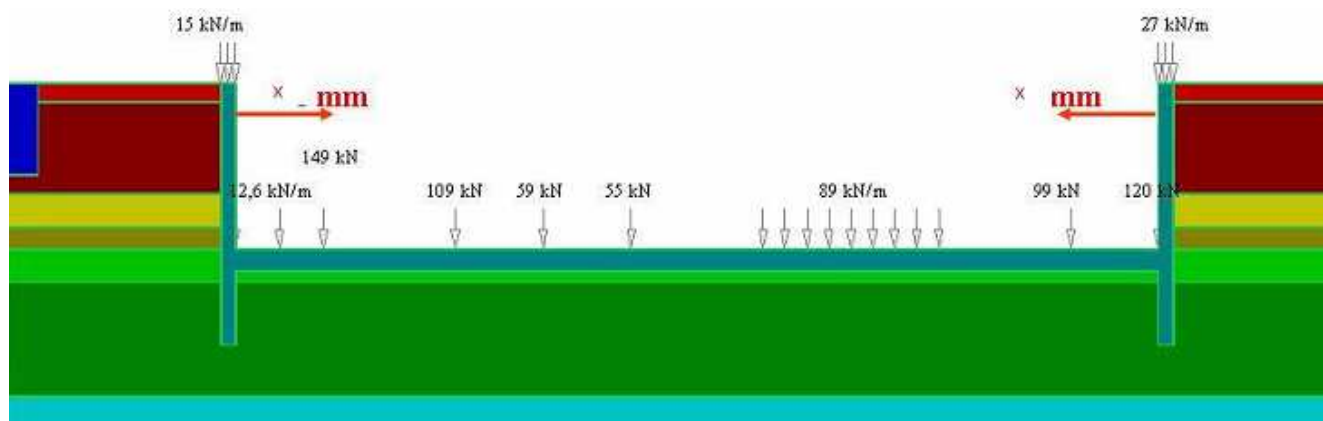
Modelowanie MES głębokiego wykopu i nowo wznoszonego budynku wraz z przyległą zabudową sprowadza się zazwyczaj do modelu 2D, w którym to model budynku głęboko posadowionego i budynku w sąsiedztwie ogranicza się jedynie do ich części podziemnej (w skrajnych przypadkach do zastosowania obciążenia zastępczego, symulującego interakcję konstrukcji z podłożem gruntowym). W przypadku obiektu nowo wznoszonego są to fundamenty, stropy i ściany poprzeczne. W przypadku sąsiednich budynków uwzględnia się zazwyczaj tylko ich fundamenty (Zaczek-Peplińska i Popielski, 2012) z pominięciem rzeczywistej geometrii i sztywności zabudowy.

Przykłady zastosowania modelu 3D do analizy głębokich wykopów, jak i problemy z tym związane, zarówno jeżeli chodzi o wielkość zadania, jak i dobór odpowiednich parametrów materiałowych podane zostały w pracach Trutego (2009) i Świecy (2011).

Na rysunku 5 przedstawiono przykładową dyskretyzację modelu wykopu w obudowie kotwionej, natomiast na rysunku 6 model MES głębokiego posadowienia budynku z uwzględnieniem sztywności jego fundamentu wraz z obciążeniem zastępczym (Barański i in., 2007).

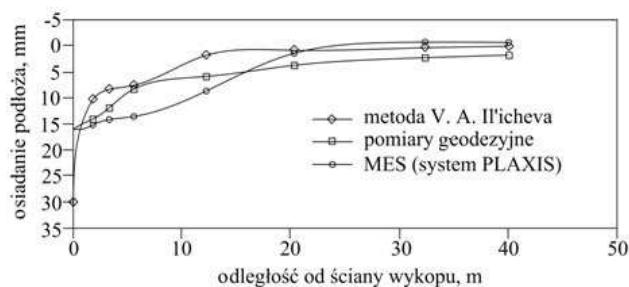


Rys. 5. Model dyskretny głębokiego wykopu z obciążonym naziemem w technologii kotwionej (www.plaxis.nl)



Rys. 6. Schemat modelu MES głębokiego wykopu z uwzględnieniem sztywności fundamentu nowo wznoszonego budynku (Barański i in., 2007)

Na rysunku 7 (Il'ichev i in., 2006) zestawiono wyniki przemieszczeń terenu za ścianą obudowy głębokiego wykopu, otrzymane na podstawie: metody elementów skończonych, metody V. A. Il'icheva i pomiarów geodezyjnych. Krzywe sporządzone na podstawie obliczeń różnią się od tej otrzymanej z pomiarów terenowych w sposób znaczący, między innymi ze względu na to, że zabudowę istniejącą, w obu przedstawionych modelach zastąpiono obciążeniem zastępczym zaniedbując rzeczywistą geometrię i sztywność obiektów w sąsiedztwie.



Rys. 7. Osiadanie podłoża za ścianą wykopu, przy uwzględnieniu obciążenia nazimowego (Il'ichev i in., 2006)

4. Uwzględnienie w analizie numerycznej geometrii i sztywności obiektu w sąsiedztwie. Badania własne

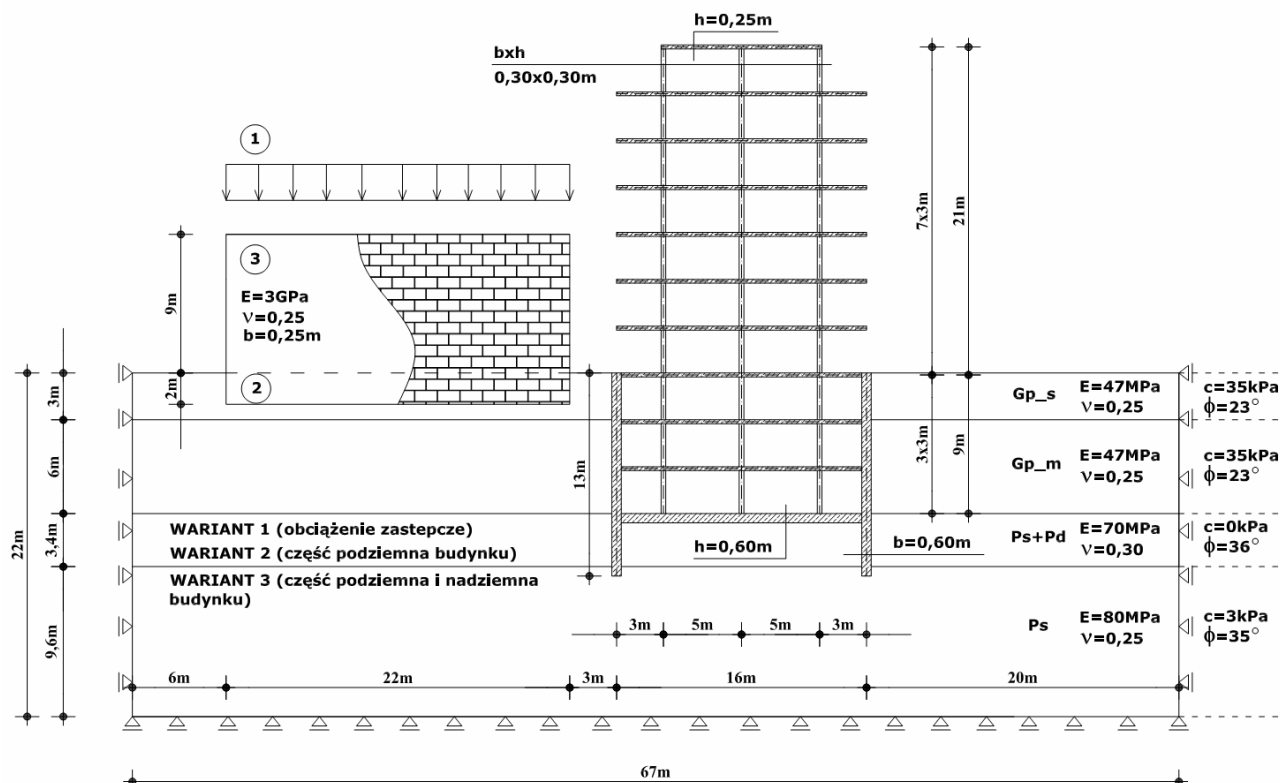
Stosując metodę elementów skończonych przeanalizowano wpływ głębokiego posadowienia budynku na stan naprężeniowo-

przemieszczeniowy podłoża gruntowego i modelowego budynku w sąsiedztwie.

Do analizy przyjęto następujące obiekty: realizowany 10-kondygnacyjny o konstrukcji płytowo-słupowej i w sąsiedztwie 4-kondygnacyjny o konstrukcji ścianowej w układzie podłużnym. Płaski schemat analizowanego układu przedstawiono na rysunku 8.

Wpływ realizowanego obiektu na sąsiednią zabudowę przeanalizowano w trzech wariantach: wariant 1: zastępując sztywność budynku w sąsiedztwie obciążeniem zastępczym; wariant 2, 3: modelując budynek w sąsiedztwie jako tarczę w płaskim stanie naprężenia – PSN (przy czym, wariant 2 dotyczy tylko części podziemnej modelowego budynku).

Analizę przeprowadzono w zakresie sprężysto-plastycznym w przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia – PSO. Model ośrodka gruntowego przyjęto jako model sprężysto idealnie plastyczny z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra (podłoże uwarstwione o parametrach przyjętych na podstawie pracy Zaczek-Peplińskiej i Popielskiego, 2012). Ścianę modelującą budynek w sąsiedztwie przyjęto jako murowaną: $E_m = 3\text{GPa}$, $\nu = 0,25$, $b = 0,25\text{m}$ (grubość ściany). Natomiast na parametry materiałowe obiektu „nowego” o konstrukcji płytowo-słupowej przyjęto: $E_{pl} = E_{sl} = 30\text{GPa}$, $\nu = 0,16$. Dyskretyzację modelu wykonano wykorzystując elementy czterowzłowe (ośrodek gruntowy, budynek w sąsiedztwie) oraz belkowe (słupy, ściana szczelinowa). Pozostałe dane obliczeniowe (między innymi podstawowe wymiary) przedstawiono na rysunku 8.



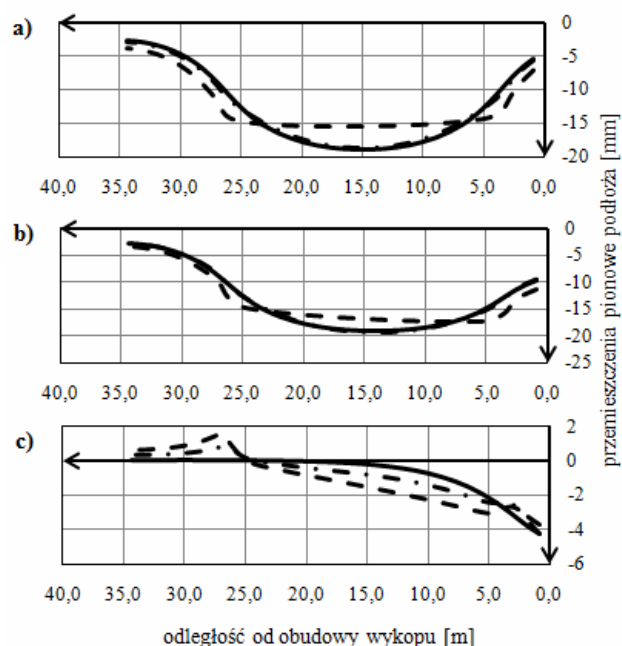
Rys. 8. Wariantowy model obliczeniowy MES do analizy głęboko posadowionego budynku wraz z sąsiednią zabudową

W analizie uwzględniono następujące fazy realizacji głębokiego posadowienia budynku: stan naprężeniowo-przemieszczeniowy układu wywołany pierwotnym posadowieniem budynku w sąsiedztwie, realizację pełną metodą stropową części podziemnej, a następnie części nadziemnej nowo wznoszonego obiektu, a także uwzględnienie w obliczeniach fazy użytkowania budynku.

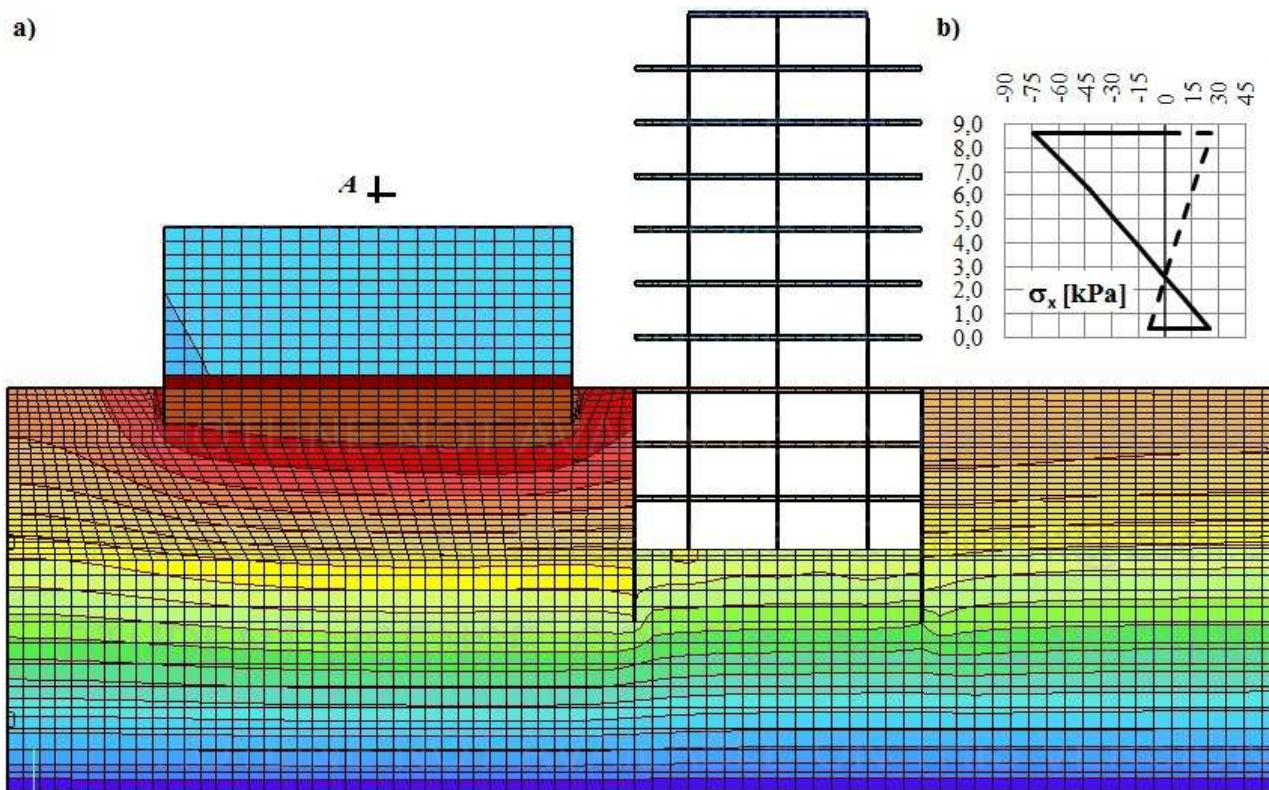
Przykładowe wyniki przemieszczeń podłoża pod fundamentem budynku w sąsiedztwie nowo wznoszonego obiektu przedstawiono na rysunku 9.

Trajektorie przemieszczeń w modelu w fazie końcowej (stan użytkowania obiektu) oraz wykres naprężeń normalnych w ścianie w przekroju A-A przedstawiono na rysunku 10. Rozkład naprężeń podano, dla następujących faz wznoszenia budynku głęboko posadowionego: stan pierwotny (stan przed budową „nowego” obiektu), faza końcowa (po wykonaniu części nadziemnej budynku głęboko posadowionego wraz z uwzględnieniem obciążenia użytkowego).

Wyniki analiz numerycznych wskazują, że uwzględnienie w obliczeniach geometrii i sztywności budynku zlokalizowanego w sąsiedztwie obiektu głęboko posadowionego daje bardziej realistyczny kształt krzywej deformacji terenu za obudową wykopu, niż w przypadku obciążenia zastępczego lub wariantu, tylko z częścią podziemną obiektu. Jednocześnie kształt krzywej opisującej deformację podłoża pod fundamentem ma istotny wpływ na rozkład naprężeń w ścianie budynku (rys. 9). Kształt krzywej osiadań terenu zależy



Rys. 9. Wykresy przemieszczeń pionowych podłoża na głębokości fundamentu modelowego budynku, istniejącego w sąsiedztwie nowo wznoszonego obiektu po uwzględnieniu: obciążenia zastępczego (linia ciągła), tylko części podziemnej obiektu (linia przerywana-kropkowana), geometrii i sztywności sąsiedniej zabudowy (linia przerywana) a) deformacja pierwotna, b) deformacja końcowa, c) deformacja wywołana wpływem wykopu i posadowienia nowo wznoszonego obiektu



Rys. 10. Model MES głębokiego posadowienia budynku wraz z sąsiednią zabudową: a) faza końcowa: trajektorie przemieszczeń w modelu, b) wykres naprężeń normalnych w przekroju A-A powstałych na skutek odkształcenia podłoża pod ścianą: w fazie pierwotnej (linia ciągła) oraz w fazie końcowej (linia przerywana)

od poszczególnych faz wznoszenia budynku głęboko posadowionego i jest różny na poszczególnych etapach budowy. Na rysunku 10b zaprezentowano rozkład naprężeń normalnych σ_x w przekroju pionowym ściany modelowego budynku w sąsiedztwie. Linia ciągła reprezentuje rozkład naprężeń w ścianie w fazie pierwotnej, natomiast linią przerywaną oznaczono rozkład naprężeń powstałych na skutek głębokiego posadowienia obiektu „nowego”. Jak można zauważyć na wykresie maksymalne naprężenia normalne σ_x , powstałe od posadowienia głębokiego obiektu mają przeciwny znak (naprężenia rozciągające) do tych ze stanu pierwotnego (naprężenia ściskające), co może mieć istotny wpływ na stan techniczny obiektu w sąsiedztwie.

Dodatkowo, kompleksowa analiza nowo wznoszonego obiektu z częścią podziemną i nadziemną wraz z sąsiednią zabudową pozwoliłaby uzyskać bardziej wszechstronne informacje na etapie projektowania inwestycji (to jest między innymi ocenę wpływu głębokiego posadowienia na sąsiednią zabudowę przy wykorzystaniu jednego, całościowego modelu numerycznego w poszczególnych fazach realizacji).

5. Podsumowanie

Jak wynika z wykonanych analiz głębokie posadowienie w sposób istotny wpływa na stan przemieszczeniowo-naprężeniowy gruntu i budynków w sąsiedztwie.

Z przeprowadzonego przeglądu literatury widoczny jest trend analizy układów podłoże gruntowe – „nowy” budynek – zabudowa istniejąca, metodą elementów skończonych. Obliczenia MES sprowadzają się obecnie zazwyczaj do modelu 2D, w którym model budynku realizowanego ogranicza się do jego części podziemnej (fundament, stropy, ściany poprzeczne). Natomiast symulacja zabudowy w sąsiedztwie sprowadza się zazwyczaj do zastosowania obciążenia zastępczego (w niektórych przypadkach w modelu 2D uwzględniane są również fundamenty wraz z częścią podziemną obiektu). Jednocześnie ważna jest kalibracja parametrów modelu obliczeniowego w korelacji z rzeczywistym zachowaniem się realizowanego obiektu.

Wydajność sprzętu komputerowego oraz możliwości algorytmów numerycznych (algorytmy przetwarzania równoległego) pozwalają na rozwiązywanie coraz to większych zadań metodą elementów skończonych. Zatem wydaje się zasadne, aby zadania interakcji podłoża gruntowego i budowli w zakresie teoretycznym modelować z uwzględnieniem geometrii oraz sztywności budynków w sąsiedztwie i z wykorzystaniem technik 3D. Jednocześnie, aby realnie ocenić oddziaływanie budynku głęboko posadowionego na sąsiednią zabudowę (głównie na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcji), wskazane jest opracowanie tak zwanych modeli śledzących, pozwalających na bardziej rzeczywiste odwzorowanie pracy konstrukcji w czasie jej wznoszenia i użytkowania, (Steckiewicz, 1979; Miedziałowski, 1994; Krętowska i Miedziałowski, 2001).

Literatura

- Barański M., Popielski P., Szczepański T., Wrona M. (2007). Analiza możliwości weryfikacji modelu numerycznego na podstawie pomiarów i badań wykonanych w trakcie wykonywania obiektu. *Czasopismo Techniczne*, Politechnika Krakowska, z. 1-Ś/2007, 3-16.
- Bentler D. J. (1998). Finite element analysis of deep excavations. Rozprawa doktorska, *Virginia Polytechnic Institute and State University*.
- Gaszyński J., Poślajko M. (2003). Analiza numeryczna zabezpieczenia wykopu przy budowie hotelu Sheraton w Krakowie., XV Konferencja Naukowa nt. „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”, Korbiewów 2003.
- Il'ichev V. A., Nikiforova N. S., Koreneva E. B. (2006). Method for calculating bed deformations of buildings near deep excavations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 43, No. 6, 189-196.
- Jen L. C. (1998). The design and performance of deep excavations in clay. Rozprawa doktorska, *Massachusetts Institute of Technology*.
- Kłosiński B. (2010). Głębokie wykopy i ich wpływ na otoczenie. *Seminarium „ściany szczelinowe”*, Warszawa.
- Krętowska J., Miedziałowski Cz. (2001). Modele interakcyjne i modele śledzące konstrukcji budynków. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej*, Budownictwo Z.21/2001, 79-189.
- Michalak H. (2008). Budynki głęboko posadowione a przemieszczenia podłoża i zabudowy w sąsiedztwie, *Geoinżynieria: drogi, mosty, tunele*, 04/2008, 66-76.
- Michalak H. (2009). Wybrane zagadnienia kształtowania konstrukcyjno-przestrzennego wielokondygnacyjnych garaży podziemnych w strefach śródmiejskich. *Górnictwo i Geoinżynieria*, Zeszyt 3/1, 257-266.
- Miedziałowski Cz. (1994). Dyskretny model złożonych konstrukcji ścianowych budynków uwzględniający współpracę podłoża gruntowego. *Rozprawy naukowe Politechniki Białostockiej*, Nr 24, Białystok.
- Nogueira C., Azevedo R., Zornberg J. (2009). Coupled Analyses of Excavations in Saturated Soil. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 9, No. 2, 73-81.
- Oka F., Higo Y., i inni (2008). Elasto-viscoplastic numerical analysis of a deep excavation in an Osaka soft clay deposit using the open-cut method. *The XXII International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Indie 2008.
- Qiong Z., Jiejiang Z., Jinming X. (2006). Analysis of foundation excavation based on ANSYS 8.0 software. *Industrial Construction*, 2006.
- Siemińska-Lewandowska A. (2001). Przemieszczenia kotwionych ścian szczelinowych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, Budownictwo, Zeszyt 139, Warszawa.
- Siemińska-Lewandowska A. (2010). Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo. *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności*, Warszawa.
- Sorbjan P., Truty A., Urbański A., Wolski W. (2001). Analiza statyczno-wytrzymałościowa ścian szczelinowej podziemia rezydencji Hyatt przy ulicy Belwederskiej i Spacerowej w Warszawie. XIII Konferencja Naukowa nt. „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”, Korbiewów 2001.
- Steckiewicz R. (1979). Współpraca budowli z podłożem gruntowym w okresie jej wznoszenia i użytkowania. *Inżynieria i Budownictwo*, 12/1979.

- Szulborski K., Michalak A., Woźniak M. (2009). Zabezpieczenia i obserwacja obiektów w sąsiedztwie głębokich wykopów. *XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*, Wisła 2009.
- Świeca M. (2011). Zasady projektowania geotechnicznego w nawiązaniu do Eurokodu 7 z zastosowaniem programów numerycznych. *Instytut Techniki Budowlanej*, Warszawa.
- Terlikowski W., Dłużewski J. (2001). Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych posadowienia z użyciem ścian szczelinowych na przemieszczenia poziome i pionowe w ujęciu metody elementów skończonych. *XIII Konferencja Naukowa nt. „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”*, Korbielew 2001.
- Truty A. (2009). Modelowanie komputerowe w zagadnieniach geotechniczno-budowlanych. *XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta*, Wisła 2009.
- Weimin Q., Liming L. (2011). Numerical simulation study on deformation of deep excavation based on ANSYS – taking deep excavation of Yichang City as background. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2011.
- Zaczek-Peplińska J., Popielski P. (2012). Utilisation of Geodetic Monitoring for Verification of the Numerical Model of Impact of a Building under Construction on Surrounding Structures. *FIG Working Week*, Rome 2012.

DEEP BUILDING FOUNDATIONS AND METHODS OF THEIR STATIC ANALYSIS METHODS

Abstract: The paper presents execution methods of deep excavation. Computational methods currently in use, indicating specified by the researchers difficulties and problems in numerical analysis are presented. Directions of further development of the topic of deep foundation static analysis using the finite element method are given. Discussed issues are illustrated by calculation example, in which the influence of the deep building foundation on the displacement-stress state of soil and buildings in direct neighborhood was examined in each stages of implementation.

NUMERYCZNE ANALIZY BEZPOŚREDNIEGO ŚCINANIA GRUNTU NIESPOISTEGO Z ZASTOSOWANIEM METODY ELEMENTÓW DYSKRETNÝCH

Paweł SZKLENNIK*

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

Streszczenie: W pracy przedstawiono rezultaty symulacji numerycznych przebiegu bezpośredniego ścinania gruntu niespoistego z wykorzystaniem modelu metody elementów dyskretnych 2D. Identyfikację parametrów kontaktu elementów przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszej kolejności ustalono parametry określające maksymalne opory tarcia, następnie zweryfikowano odpowiednie wartości poszczególnych modułów sztywności. Poprzez porównanie rezultatów symulacji z wynikami testów laboratoryjnych oraz wartościami kąta tarcia wewnętrznego dostępnymi w literaturze wykazano możliwość symulacji przebiegu ścinania gruntów o różnym uziarnieniu.

Słowa kluczowe: bezpośrednie ścinanie, metoda elementów dyskretnych, symulacje numeryczne.

1. Wprowadzenie

Badanie bezpośredniego ścinania jest prostą metodą laboratoryjną określania wytrzymałości gruntu. Numeryczne symulacje tego badania z zastosowaniem metody elementów dyskretnych (ang. DEM) przedstawiane w literaturze dowodzą, że jest to nadal aktualny problem. Przykładowo, analizy rozkładów naprężeń i odkształceń w całej próbce oraz w jej wybranych strefach, a także zmian porowatości w strefie ścinania i lokalnego zróżnicowania obrotów elementów przedstawione są w pracy Zhanga i Thorntona (2007). W analizowanych badaniach zastosowano modele skrzynek posiadające górną część przesuwą pionowo lub sztywno połączoną ze ściankami bocznymi. Wpływ zmian wymiarów skrzynki aparatu na przebieg próby ścinania ośrodka modelowego pokazano w pracy Wanga i Gutierrez (2010). Uwzględniano przy tym różne średnice modelowych elementów walcowych. Określano zmiany wartości naprężeń oraz odkształceń. Model trójwymiarowy znaleźć można w pracy Yana i Ji (2010), gdzie do analiz naprężeń i deformacji wykorzystano układ zawierający elementy kuliste oraz utworzone z przenikających się dwóch lub więcej kul, w celu uzyskania elementów o nieregularnych kształtach.

Symulacja numeryczna testu ścinania wymaga przede wszystkim określenia odpowiednich wartości parametrów kontaktu elementów dyskretnych, to jest współczynników

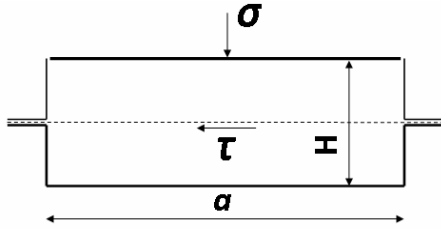
tarcia i modułów sztywności. Współczynniki tarcia powinny modelować szorstkość i nierówność powierzchni rzeczywistych ziaren piasku. W przybliżeniu można osiągnąć to poprzez odpowiednie zwiększenie wartości tych współczynników.

Celem pracy jest analiza wpływu współczynników tarcia toczonego i suwnego oraz parametrów sztywności na wielkość oporu ścinania w modelu, a następnie ich identyfikacja na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych na rzeczywistych próbkach gruntu oraz danych literaturowych.

2. Przebieg badania bezpośredniego ścinania

Bezpośrednie ścinanie w aparacie skrzynkowym (rys. 1) polega na ścięciu próbki gruntu obciążonej siłą pionową, wywołującą – dzięki budowie aparatu – równomierne naprężenie pionowe σ . Ścięcie odbywa się po wymuszonej płaszczyźnie przez przesuw górnej ramki aparatu z ustaloną prędkością $v(t)$. Wytrzymałość na ścinanie τ określa się na podstawie siły ścinającej F_{sc} odczytanej w momencie, gdy jej wartość przestaje rosnąć albo w chwili przesunięcia górnej ramki (Δl) równego 10% boku skrzynki a (PN-88/B-04481 *Grundy budowlane. Badania próbek gruntu*). Z kilku par wyników $\sigma - \tau$ wyznaczana jest wartość kąta tarcia wewnętrznego.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: p.szklennik@doktoranci.pb.edu.pl



Rys. 1. Schemat skrzynki aparatu bezpośredniego ścinania wraz z oddziaływaniami: τ – składowa styczna wektora naprężenia w chwili ścinania, σ – składowa normalna wektora naprężenia do płaszczyzny zniszczenia.

3. Zastosowane ujęcie metody elementów dyskretnych 2D

Modelowany ośrodek traktowany jest jako zbiór sztywnych elementów walcowych poddanych działaniu ciężaru własnego i obciążeń zewnętrznych. Dla każdego elementu i w każdym kroku czasowym Δt spełnione muszą zostać równania ruchu Newtona:

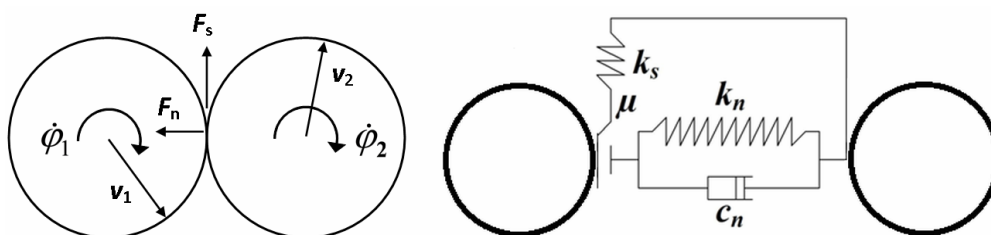
$$m_i \cdot \ddot{u}_i = \sum F_{xi}, \quad m_i \cdot \ddot{v}_i = \sum F_{yi}, \quad J_i \cdot \ddot{\phi}_i = \sum M_i \quad (1)$$

gdzie: m_i , J_i są odpowiednio masą i momentem bezwładności elementu dyskretnego, $\ddot{u}_i$, $\ddot{v}_i$, $\ddot{\phi}_i$ oznaczają kolejno przyspieszenie wzdłuż osi x , y oraz przyspieszenie obrotowe, $\sum F_{xi}$, $\sum F_{yi}$, $\sum M_i$ to wypadkowe sił zewnętrznych i momentów działające na dany element. Całkowanie równań ruchu z wykorzystaniem jawnego schematu umożliwia określenie liniowych i obrotowych prędkości oraz przemieszczeń. Jawny schemat całkowania wymaga ograniczenia wielkości kroku czasowego Δt do wartości krytycznej równej

$$\Delta t_c = (2/\omega_{\max}) \left(\sqrt{1 + \eta^2} + \eta \right) \quad (2)$$

gdzie: $\omega_{\max}$ jest najwyższą częstotliwością własną układu, a η określa stosunek zastosowanego tłumienia do tłumienia krytycznego dla drgań swobodnych o częstotliwości $\omega_{\max}$. Przy bardziej skomplikowanych układach dyskretnych powyższa zależność daje szacunkową wartość przy przyjęciu najmniejszej masy elementu modelu oraz maksymalnej sztywności.

W przypadku kontaktu dwóch elementów powstają między nimi oddziaływania obliczane według założonych związków konstytutywnych dla kontaktu. Podstawowym z nich jest siła w miejscu styku elementów (rys. 2), którą można rozłożyć na składową styczną F_s i normalną F_n .



Rys. 2. Oddziaływania między elementami walcowymi oraz model kontaktu

W pracy zastosowano model kontaktu z tarciem, bez odporności na rozciąganie (rys. 2). Opisany jest on modułem sztywności dla kierunku normalnego (k_n) i stycznego (k_s) do powierzchni kontaktu, a także współczynnikiem tłumienia c_n i tarcia suwnego μ . Ponadto uwzględniono tarcie toczone mające istotny wpływ na opór ścinania, określone sztywnością k_θ i współczynnikiem tarcia tocznego f , co zostanie zaprezentowane w dalszej części pracy. Analizy wpływu oporu toczenia w DEM były rozważane między innymi w pracach (Iwashita i Oda, 1998; Jiang i in., 2005).

W pracy prezentowane są wyniki otrzymane za pomocą autorskiego programu numerycznego, który uwzględnia opis ruchu i układ lokalnych sił kontaktowych typowy dla sformułowania DEM. Algorytm metody elementów dyskretnych został szczegółowo opisany między innymi w pracach (Rojek, 2007; Widuliński i in., 2009).

Siła normalna określana jest na podstawie szerokości strefy nakładania się elementów g oraz przyjętej sztywności k_n według wzoru

$$F_n = k_n \cdot g + c_n \cdot v_{nw} \quad (3)$$

gdzie v_{nw} jest składową normalną względną prędkości w punkcie styku. Tłumienie określane jest jako część tłumienia krytycznego c_{cr} przez współczynnik α_c , stąd:

$$c_n = \alpha_c \cdot c_{cr} \quad (4)$$

W kontakcie dwóch elementów dyskretnych zachodzi:

$$c_{cr} = 2\sqrt{(m_1 m_2 k_n)} / (m_1 + m_2) \quad (5)$$

gdzie m_i to masa elementu i .

Siła styczna zależna jest od sztywności k_s oraz składowej stycznej względnej prędkości liniowej w punkcie kontaktu elementów v_{sw} . Określany jest tak zwany przyrostowy poślizg

$$\Delta u = v_{sw} \cdot \Delta t \quad (6)$$

a następnie wartość siły stycznej

$$F_s = F_s^{n-1} + k_s \cdot \Delta u \quad (7)$$

gdzie F_s^{n-1} jest wartością z poprzedniego kroku czasowego. Według prawa tarcia Coulomba ograniczenie tej siły ma postać:

$$|F_s| \leq F_s^{\max} = \mu |F_n| \quad (8)$$

Moment oporu toczenia M_f wyznaczany jest analogicznie do oporu tarcia suwnego. Określana jest względna prędkość obrotowa w punkcie kontaktu, współczynniki k_s i μ są zastępowane odpowiednio przez „sztywność obrotową” k_θ oraz współczynnik tarcia tocznego f . Parametr f definiowany jest poprzez współczynnik β jako część promienia mniejszego elementu z pary kontaktowej ($r_{\min}$), stąd:

$$f = \beta \cdot r_{\min} \quad (9)$$

Ograniczenie wartości tego oporu ma postać

$$|M_f| \leq M_f^{\max} = f \cdot |F_n|. \quad (10)$$

Porównanie niektórych modeli obliczeniowych oporu toczenia występujących w literaturze zaprezentowano w pracy Ai i in. (2011). W analizowanych modelach sztywność k_θ uzależniana była przykładowo od k_s i promieni kontaktujących się elementów czy aktualnej wartości normalnej siły kontaktowej.

Przy określaniu sztywności lokalnych uzasadnione jest uwzględnienie wymiarów kontaktujących się elementów, na przykład przez założenie ich szeregowego oddziaływania w kontakcie (Widuliński i in., 2009). Ze względu na fakt, iż w analizowanych dalej próbkach stosunek średnicy maksymalnej $d_{\max}$ do minimalnej $d_{\min}$ nie jest znaczny (najwyższy wynosi 2,4) sztywności odniesiono do średniej średnicy elementu w modelu d_{sred} . Stąd w każdym lokalnym kontakcie w objętości danej próbki mają one wartości stałe wynoszące

$$k_s = E_s d_{sred} \quad (11)$$

oraz

$$k_\theta = E_\theta r_{sred}^2 \quad (12)$$

gdzie: E_s i E_θ są odpowiednio stycznym i tocznym „globalnym” modułem sztywności, a:

$$r_{sred} = d_{sred} / 2. \quad (13)$$

Sztywność normalna ze względu na jej niewielki wpływ na opór ścinania przyjmowana jest jednakowa w każdym modelu.

4. Badania laboratoryjne i dane literaturowe

Przeprowadzono dwie serie badań laboratoryjnych (każda przy innej prędkości ścinania) po 4 oznaczenia kąta tarcia wewnętrznego gruntu w aparacie bezpośredniego ścinania. Badano zagęszczony piasek o ziarnach $d \leq 2,0$ mm. Prędkość ścinania w pierwszej serii badań wynosiła $v_s = 1$ mm/min, a w drugiej $v_s = 10$ mm/min. Zakres naprężeń pionowych wynosił $\sigma = 50-300$ kPa, zmieniano σ co 50 kPa. Łącznie wykonano 48 ścieć próbek gruntu. Wyniki (kąty tarcia wewnętrznego $\Phi_1-\Phi_4$

i średnia wartość z wyników 4 badań Φ_{sred} określanych przy danej prędkości) przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki badań laboratoryjnych

Prędkość ścinania	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_{sred}
$v_s = 1$ mm/min	41,4	38,5	42,1	43,0	41,2
$v_s = 10$ mm/min	40,9	43,1	42,5	43,1	42,4

Z przeglądu danych dostępnych w literaturze dla zagęszczonego ($I_D > 0,6$) piasku grubego wynika, że kąt tarcia wewnętrznego może przyjmować wartość z zakresu: $\Phi_u = 34-36^\circ$ (PN-81/B-03020 *Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie*), efektywny $\Phi' = 36-39^\circ$ (Wiłun, 2005), wartości obliczeniowe $\Phi = 43^\circ$ (norma radziecka SnIP-II-15-74 na podstawie pracy Wiłuna (2005)). Badania laboratoryjne dały więc wartości dość wysokie – wykraczające poza dwa z trzech przedziałów podanych w literaturze. Dodatkowo stwierdzono, że różnica v_s nie wpłynęła znacząco na wyniki oznaczeń, stąd w celu skrócenia czasu obliczeń w symulacjach numerycznych stosowano $v_s = 10$ mm/min.

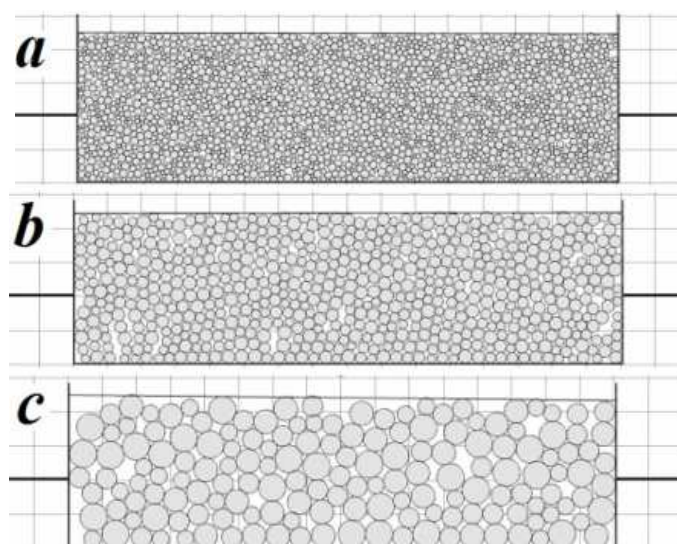
5. Symulacje numeryczne

5.1. Dane wejściowe

Modele numeryczne analizowane w dalszej części pracy oznaczone jako I, II oraz III, przedstawiono na rysunku 3. Średnice elementów walcowych wynoszą $d_{el}^I = 0,5-1,2$ mm, $d_{el}^{II} = 1,3-2,0$ mm co 0,05 mm oraz $d_{el}^{III} = 2,5-4,0$ mm co 0,5 mm. Wartości średnie $d_{sred}^I = 0,84$ mm, $d_{sred}^{II} = 1,63$ mm oraz $d_{sred}^{III} = 3,18$ mm. Na podstawie uziarnienia I i II model można zakwalifikować jako piasek gruby, natomiast model III jest właściwy dla frakcji żwirowej (Wiłun, 2005).

W analizie numerycznej uwzględniano tylko docisk σ – nie modelowano dodatkowego zagęszczania. W modelach II oraz III w celu uwidocznienia wpływu geometrii elementów walcowych celowo zastosowano jedynie elementy większe bez mieszania ich z mniejszymi wykorzystanymi w modelu I. Wymiary płytki dociskowej to $8,0 \times 8,0 \times 0,1$ cm. Należy podkreślić, że płytka dociskowa miała możliwość przesuwu pionowego i obrotu.

Pozostałe dane wspólne dla wszystkich prezentowanych symulacji numerycznych: $a = 8,0$ cm, $H = 2,2$ cm (rys. 1), teoretyczna długość elementów walcowych $l_e = 8,0$ cm, gęstość materiału elementów $\rho_{mat} = 2300$ kg/m³, płytki dociskowej $\rho_{plyt} = 7860$ kg/m³, mnożnik do współczynnika tłumienia $\alpha_c = 1,0$, prędkość ścinania $v_s = 10$ mm/min. Przy ustalaniu naprężenia pionowego σ – ze względu na znaczną szerokość skrzynki – siły tarcia między ściankami pionowymi a elementami dyskretnymi pomijano.



Rys. 3. Uziarnienie modeli: a) model I, b) model II, c) model III

5.2. Analizy wpływu współczynników tarcia suwnego i tocznego

W tablicy 2 przedstawiono rezultaty dwóch serii symulacji badań modelu I, które posłużyły do określenia współczynników tarcia tocznego (mnożnik β) i suwnego μ między określonymi powierzchniami. Moduły sztywności wynosiły $E_s = 238 \text{ MN/m}^2$, $E_\theta = 28600 \text{ N/m}$, $k_n = 200 \text{ kN/m}$. Indeksy przy współczynnikach β i μ oznaczają pary powierzchni: element dyskretny (E), ścianki pionowe aparatu (S), dno aparatu (D), płytka dociskowa (P). Sprawdzanie wysokich wartości współczynników o indeksach ED, EP uzasadnia fakt, iż w rzeczywistym aparacie zakłada się z obu stron ścinanej próbki płytki oporowe o ząbkowanej powierzchni zwiększające zazębienie z ziarnami. Pierwszy test (p) jest testem porównawczym, w następnych współczynniki były zwiększane (1-2 do 1-13, 2-9 do 2-12) lub zmniejszane (2-2 do 2-8) w różnych kombinacjach względem testu porównawczego. Symbol „.” oznacza wartość nie zmienioną względem (p). Wpływ tarcia oceniano odczytując maksymalną siłę ścinającą F_{SC} podczas przesuwu o $\Delta l = 4 \text{ mm}$ przy $\sigma = 50 \text{ kPa}$.

Na podstawie symulacji serii I stwierdzono: nieistotny wpływ zwiększenia współczynników $\mu_{ED,EP}$ lub $\beta_{ED,EP}$ (1-2, 1-3), niewielki wzrost F_{SC} przy zwiększeniu obu jednocześnie (1-4), nieznaczący wpływ powiększenia współczynnika β_{EE} (1-5), znaczny wpływ μ_{EE} (1-6), zaś największy wpływ przy jednoczesnym wzroście μ_{EE} i β_{EE} (1-7), istotny wpływ wzrostu μ_{ES} (1-11 w stosunku do 1-10).

Na podstawie symulacji serii II zaobserwowano: znacznie większy wpływ wartości $\mu_{ED,EP}$ niż $\beta_{ED,EP}$ (2-2 oraz 2-3), brak istotnych zmian przy spadku β_{EE} z 2,0 na 1,1 (2-6), brak istotnych zmian przy dalszym wzroście μ_{ES} (2-9) oraz μ_{EE} i β_{EE} (2-12). Do kolejnych analiz przyjęto te wartości współczynników tarcia, powyżej których nie obserwowano dalszego wyraźnego wzrostu oporu ścinania: $\mu_{EE} = 1,8$, $\mu_{ES} = 0,7$, $\mu_{ED,EP} = 1,0$, $\beta_{EE} = 1,1$, $\beta_{ES} = 0,2$, $\beta_{ED,EP} = 1,0$.

Tab. 2. Analiza wpływu współczynników tarcia suwnego i tocznego na wartość F_{SC}

SERIA I							
	μ_{EE}	μ_{ES}	$\mu_{ED,EP}$	β_{EE}	β_{ES}	$\beta_{ED,EP}$	$F_{SC} [\text{N}]$
1-1(p)	0,3	0,3	1,0	0,3	0,1	1,0	129
1-2	.	.	.	.	.	3,2	127
1-3	.	.	3,0	.	.	.	128
1-4	.	.	3,0	.	.	3,2	138
1-5	.	.	.	2,0	.	.	133
1-6	1,8	.	.	.	.	.	225
1-7	1,8	.	.	2,0	.	.	276
1-8	.	.	3,0	2,0	.	3,2	133
1-9	1,8	.	3,0	.	.	3,2	229
1-10	1,8	.	3,0	2,0	.	3,2	262
1-11	1,8	1,0	3,0	2,0	.	3,2	298
1-12	1,8	.	3,0	2,0	0,4	3,2	269
1-13	1,8	1,0	3,0	2,0	0,4	3,2	305
SERIA II							
	μ_{EE}	μ_{ES}	$\mu_{ED,EP}$	β_{EE}	β_{ES}	$\beta_{ED,EP}$	$F_{SC} [\text{N}]$
2-1(p)	1,8	1,0	1,0	2,0	0,2	1,0	298
2-2	.	.	.	.	.	0,3	293
2-3	.	.	0,3	.	.	.	209
2-4	.	.	0,3	.	.	0,3	204
2-5	.	0,7	.	.	.	.	291
2-6	.	.	.	1,1	.	.	294
2-7	1,0	.	.	.	.	.	244
2-8	1,0	.	.	1,1	.	.	237
2-9	.	1,5	.	.	.	.	304
2-10	2,2	.	.	.	.	.	306
2-11	.	.	.	2,3	.	.	302
2-12	2,2	.	.	2,3	.	.	299

5.3. Analizy wpływu i identyfikacja parametrów sztywności na podstawie kąta tarcia wewnętrznego

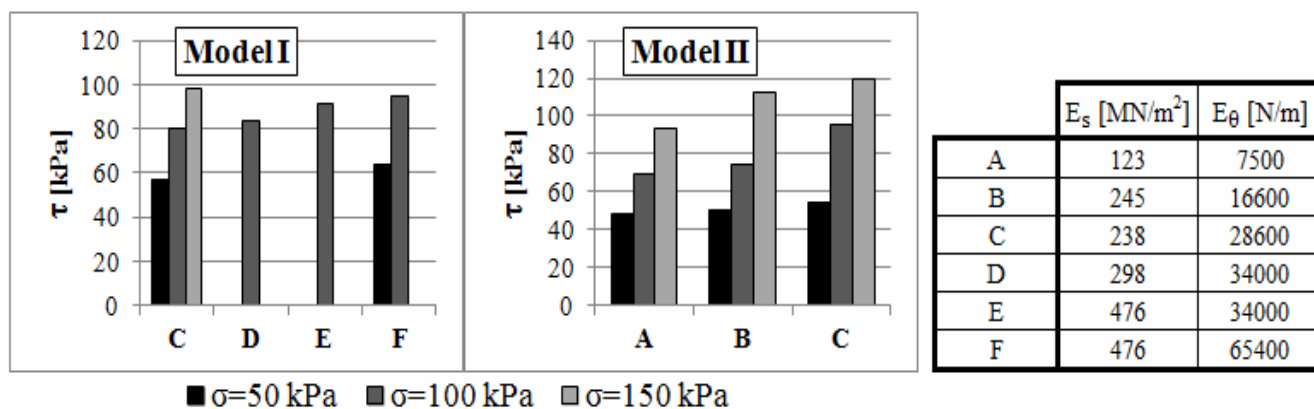
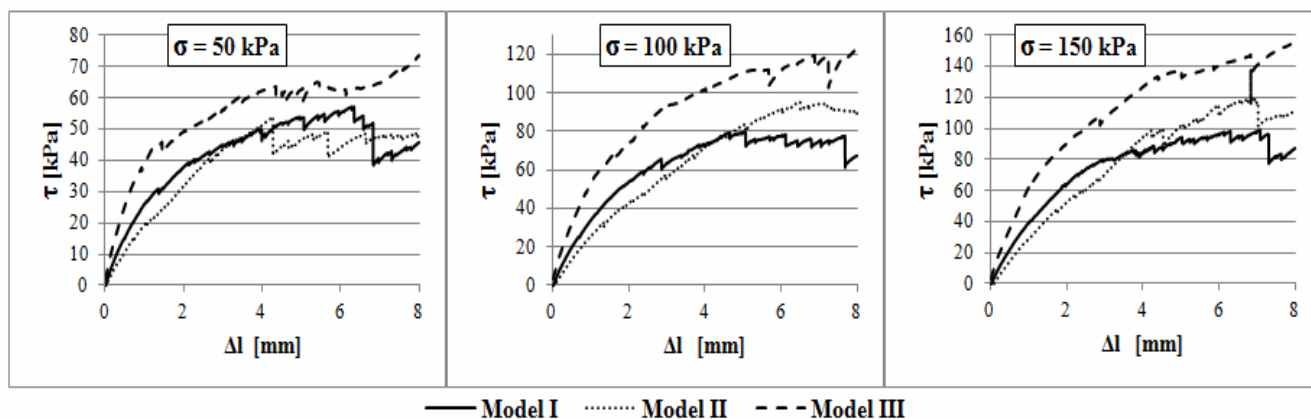
Przy określaniu kąta tarcia wewnętrznego Φ , ze względu na dość znaczne naprężenia pionowe, zwiększono lokalną sztywność normalną do $k_n = 400$ kN/m. Porównano Φ otrzymywane przy różnych globalnych modułach sztywności oraz naciskach σ w modelu I oraz II. Jako wyjściowe moduły sztywności przyjęto wartości użyte w analizach tarcia ($E_s = 238$ MN/m², $E_\theta = 28600$ N/m). Przesuw ramki w każdym przypadku wynosił $\Delta l = 8$ mm. Wyniki symulacji porównawczych przy różnych E_s i E_θ zilustrowano na rysunku 4. Na ich podstawie ostatecznie przyjęto wartości $E_s = 238$ MN/m², $E_\theta = 28600$ N/m jako te, które opisują ośrodek o oczekiwanej wytrzymałości. Dokładny przebieg zmian τ przy danym naprężeniu σ dla zidentyfikowanych parametrów przedstawia rysunek 5.

Dodatkowo wykonano porównawczą symulację dla modelu III odpowiadającego uziarnieniem frakcji zwirowej. Uzyskane wartości oporów ścinania oraz kątów Φ zestawiono w tabeli 3. Wyniki oznaczone „*” dla modelu II dotyczą symulacji przeprowadzonej na wartościach k_s oraz k_θ z modelu I – bez uwzględnienia zwiększenia d_{sred} . Wyraźnie widoczny spadek wartości Φ mimo wzrostu średnic elementów walcowych uzasadnia uzależnianie sztywności lokalnych od wymiarów elementów.

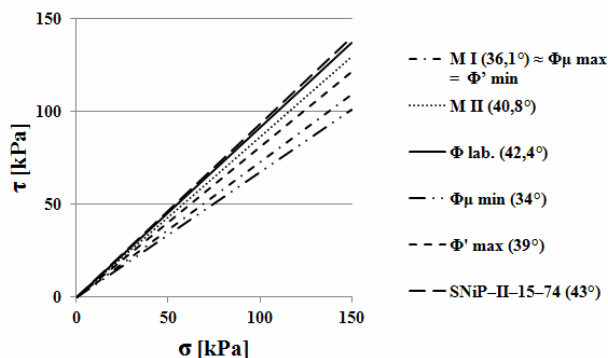
Tab. 3. Naprężenia ścinające τ oraz kąty tarcia wewnętrznego Φ

MODEL I		MODEL II	
σ [kPa]	τ [kPa]	σ [kPa]	τ [kPa]
50	57,3	50	54,0
100	79,7	100	95,6
150	98,0	150	119,5
$\Phi = 36,1^\circ$		$\Phi = 40,8^\circ$	
MODEL II *		MODEL III	
σ [kPa]	τ [kPa]	σ [kPa]	τ [kPa]
50	48,4	50	73,5
100	69,5	100	123,1
150	93,3	150	155,0
$\Phi = 33,7^\circ$		$\Phi = 48,3^\circ$	

Wysokie wartości kąta tarcia wewnętrznego uzyskane w modelach II i III można tłumaczyć faktem, że elementy modelowe charakteryzowały się dość dużą średnicą, a w przypadku modelu III – znacznie mniejszym stosunkiem rozmiaru skrzynki do wielkości elementów. Podkreślić należy również, że naprężenia ścinające w modelu III (rys. 5) – w przeciwieństwie do dwóch pozostałych – w momencie osiągnięcia przesunięcia ramki $\Delta l = 8$ mm nie wykazują tak wyraźnego spadku lub stabilizacji.

Rys. 4. Opór ścinania przy wybranych konfiguracjach E_s i E_θ Rys. 5. Wartości oporu ścinania τ w funkcji Δl przy różnych σ

Porównanie numerycznych wartości Φ z modelu I (M I) i II (M II) z wartościami opisanymi w rozdziale 4 pracy, otrzymanymi w badaniach laboratoryjnych (oznaczonymi na rysunku 6 jako $\Phi_{lab.}$) oraz wynikami badań dostępnymi w literaturze dla piasku grubego, przedstawiono na rysunku 6. Ich zgodność można uznać za zadowalającą.



Rys. 6. Porównanie wartości Φ – numerycznych, laboratoryjnych oraz literaturowych

6. Podsumowanie

Można stwierdzić, że prezentowane wyniki numeryczne – dla zidentyfikowanych parametrów sztywności, przy uwzględnieniu szorstkości i nieregularności kształtu ziaren poprzez odpowiednie zwiększanie oporów tarcia – wykazują dobrą zgodność z rzeczywistymi wartościami kątów tarcia wewnętrznego piasku o podobnym uziarnieniu. Stosowana metoda analizy numerycznej może w przybliżeniu symulować zachowanie ośrodka sypkiego – gruntu niespoistego mimo uproszczenia układu do płaskiego stanu naprężenia (PSN). Przewagą takiego podejścia nad modelami ciągłymi jest łatwiejsze uwzględnianie imperfekcji ułożenia ziaren oraz modyfikowanie parametrów tarcia i sztywności kontaktu na poziomie pojedynczych elementów.

Literatura

- Ai J., Chen J. F., Rotter J. M., Ooi J. Y. (2011). Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. *Powder Technology*, Vol. 206, No. 30, 269-282.
- Iwashita K., Oda M. (1998). Rolling Resistance at Contacts in Simulation of Shear Band Development by DEM. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 3, 285-292.
- Jiang M. J., Yu H.-S., Harris D. (2005). A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance. *Computers and Geotechnics*, Vol. 32, No. 5, 340-357.
- Rojek J. (2007). Modelowanie i symulacja komputerowa złożonych zagadnień mechaniki nieliniowej metodami elementów skończonych i dyskretnych. *Instytut Podstaw Informatyki PAN*, Warszawa.
- Wang J., Gutierrez M. (2010). Discrete element simulations of direct shear specimen scale effects. *Géotechnique*, Vol. 60, No. 5, 395-409.
- Widuliński Ł., Kozicki J., Teichman J. (2009). Numerical Simulations of Triaxial Test with Sand Using DEM. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, Vol. 56, No. 3-4, 149-172.
- Wiłun Z. (2005). *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Yan Y., Ji S. (2010). Discrete element modeling of direct shear tests for a granular material. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 34, No. 9, 978-990.
- Zhang L., Thornton C. (2007). A numerical examination of the direct shear test. *Géotechnique*, Vol. 57, No. 4, 343-354.

NUMERICAL ANALYSES OF THE DIRECT SHEARING OF NON-COHESIVE SOIL USING THE DISCRETE ELEMENT METHOD

Abstract: The paper presents results of the numerical simulations of the direct shearing of non-cohesive soil using two-dimensional discrete element method. Identification of contact stiffness parameters as well as sliding and rolling friction coefficients was the main subject of the work. Grain roughness and its shape effect were simulated by increasing friction parameters. Internal friction angles obtained by the numerical calculations were compared with the results of the laboratory tests and the values from the literature sources. It was shown that it is possible to simulate shear strength of soil samples with various grain size distribution using the discrete element method simplified to two dimensions.

POMPA CIEPŁA NA TLE INNYCH ŹRÓDEŁ CIEPŁA W PRZYPADKU BUDYNKÓW WIELORODZINNYCH

Justyna TOPOLAŃSKA, Tomasz Janusz TELESZEWSKI*

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

Streszczenie: W artykule przedstawiono podstawowe informacje o wybranych paliwach stosowanych w kotłowniach wraz z ich wadami i zaletami oraz w szerszym zakresie o pompie ciepła. Następnie dokonano wyboru układu technologicznego i doboru urządzeń, po czym zestawiono koszty inwestycyjne i eksploatacyjne kotłowni opalanej olejem opałowym, gazem ziemnym, paliwem stałym (peletami) a także kotłowni z pompą ciepła. Na podstawie otrzymanych wartości porównano źródła ciepła – określono, które jest najkorzystniejsze pod względem finansowym oraz zwrócono szczególną uwagę, jak prezentuje się na tym tle pompa ciepła.

Słowa kluczowe: źródła ciepła, pompy ciepła, pompa ciepła, koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

1. Wprowadzenie

Obecnie istnieje duża różnorodność wśród źródeł ciepła możliwych do zastosowania w budownictwie wielorodzinnym. Wciąż bardzo popularne są kotłownie opalane paliwami tradycyjnymi – węglem kamiennym lub brunatnym, olejem opałowym lub gazem. Jednocześnie wizja wyczerpania się tych paliw powoduje poszukiwanie nowych form pozyskiwania energii, wśród których najpopularniejsze są pompy ciepła i energia z biomasy.

Przy wyborze rodzaju źródła ciepła kierować się można różnymi kryteriami. Istotnym jest, czy paliwo na którym będzie się opierała dana technologia, jest dostępne na wybranym obszarze. Ma to szczególnie istotne znaczenie w przypadku gazu ziemnego, którego zastosowanie jest ograniczone zasięgiem sieci gazowej. W dobie działań proekologicznych bardzo ważne są także parametry emisji spalin – najlepiej by były one jak najniższe, ich wartość poniżej standardów pozwala na zyskowny handel emisjami. Rozwój w technologii umożliwia zastosowanie różnorodnych urządzeń automatycznej regulacji – zastosowanie rozwiązania dającego się łatwo kontrolować przy ich użyciu zwiększa komfort obsługi danej kotłowni (minimalizując ją do okresowych kontroli) oraz oszczędność paliwa przy maksymalnym dopasowaniu jego zużycia do aktualnych potrzeb. Dodatkowo rozważyć należy też, czy przy pomieszczeniu kotłowni będzie dostateczna ilość miejsca na składowanie paliwa. Zaś najważniejszą kwestią

jest porównanie nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych przy danym rodzaju źródła ciepła.

2. Paliwa stosowane w kotłowniach

2.1. Paliwa tradycyjne – gaz ziemny i olej opałowy

Paliwa gazowe stanowią mieszaniny gazów palnych (do których zaliczają się węglowodory: metan, etan i inne) i niepalnych (tu wymienić należy gazy obojętne – dwutlenek węgla, tlen, azot oraz zanieczyszczenia – parę wodną, siarkowodor, amoniak). Gazy pochodzenia naturalnego są nazywane gazem ziemnym. Ich skład chemiczny zmienia się w zależności od miejsca powstawania, jednak zawsze główny składnik to metan (50-99%). Gaz ziemny występuje w złożach tylko gazowych lub łącznie z ropą naftową. Wśród jego zalet wymienić należy: nietoksyczność (nie zawiera tlenu węgla), tani transport, brak konieczności magazynowania u odbiorcy, czystość spalania, dużą wartość opałową, możliwość całkowitego zautomatyzowania procesów spalania (Mizielińska i Olszak, 2005; Koczyk 2009).

Większość paliw ciekłych jest uzyskiwanych z ropy naftowej, czyli ciekłej mieszaniny węglowodorów z domieszką substancji mineralnych. Do ogrzewania pomieszczeń wykorzystywane są produkty destylacji frakcyjnej lub rafinacji ropy naftowej. Oleje opałowe dzieli się na lekkie, średnie i ciężkie. Najkorzystniejszą wartością opałową i najniższą zawartością siarki

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

charakteryzuje się olej opałowy lekki. Do zalet tego rodzaju paliwa (Mizielińska i Olszak, 2005; Koczyk 2009) zalicza się: wysoką (najwyższą) wartość opałową, łatwość transportu, kontrolę spalania, małą emisję zanieczyszczeń, zautomatyzowaną obsługę kotłowni.

2.2. Biomasa – coraz popularniejsze paliwo ekologiczne

W ostatnim czasie coraz większą rolę w wytwarzaniu energii cieplnej odgrywa nie bezpośrednie spalanie drewna, lecz spalanie biomasy – słomy czy odpadów drzewnych. Charakteryzując to paliwo należy zwrócić uwagę na małą zawartość azotu i siarki oraz części niepalnych. Biomase można spalać bezpośrednio lub w formach przetworzonych: brykietach (sprasowane rozdrobnione drewno energetyczne) lub granulach/peletach (o kształcie cylindrycznym). Ponadto źródłem biomasy mogą być również specjalne rośliny energetyczne. Zaliczane są tu rośliny uprawne (na przykład zboża, rzepak, trzcina), rośliny drzewiaste o szybkiej rotacji (topola, wierzba) oraz szybko rosnące i wieloletnie rośliny trawiaste (Nantka, 2006; Pisarek i Hunder, 2002).

Pelety są produkowane przede wszystkim z wiór i trocin, które są przemysłowym odpadem drzewnym. Proces produkcyjny wygląda następująco: do matrycy, pod wysokim ciśnieniem, wpychany jest starty materiał, nie jest konieczne stosowanie dodatkowego materiału scalającego cząstki. W dalszej kolejności pelety są poddawane schłodzeniu (Gradziuk i in., 2003).

Nowoczesne kotły na pelet nie ustępują kotłom na gaz lub olej. Samoczynnie rozpalają oraz dozują paliwo, co wpływa na wysoki komfort użytkowania. Paliwo doprowadzane jest automatycznie ze zbiornika znajdującego się w pobliżu kotła. Kotły można wyposażać w automatykę pogodową, sterowanie pokojowe, oraz sterowanie obiegami grzewczymi i temperaturą ciepłej wody użytkowej. Najnowocześniejsze kotły na pelet posiadają sondy lambda, które pozwalają na dodatkową redukcję zużycia paliwa.

3. Pompa ciepła

3.1. Informacje podstawowe

Pompą ciepła możemy nazwać urządzenie, które przenosi ciepło z ośrodka o niższej temperaturze do ośrodka o wyższej temperaturze. Jest to możliwe pod warunkiem dostarczenia energii napędowej.

Podstawowy podział pomp ciepła (Zawadzki, 2003):

- pompy absorpcyjne (z napędem cieplnym),
- pompy termoelektryczne (z napędem elektrycznym),
- pompy sprężarkowe (z napędem mechanicznym).

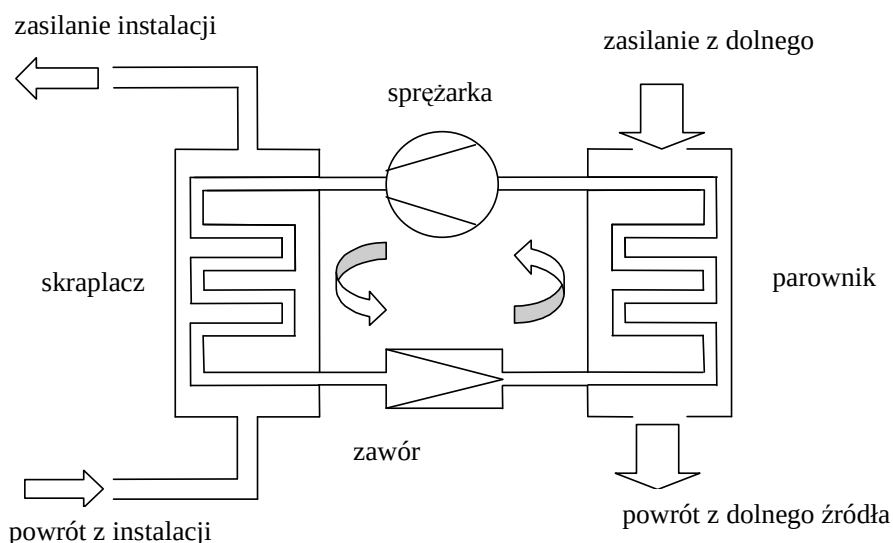
Sorpcyjne pompy ciepła są mniej popularne niż sprężarkowe, jednakże posiadają liczne zalety. Schemat działania opiera się na dwóch obiegach: obiegu właściwym (skraplacz, zawór rozprężny, parownik) i obiegu sprężarki termicznej (absorber, warnik, pompa roztworu, zawór rozprężny). Sprężanie par czynnika roboczego zachodzi w sprężarce termicznej za pośrednictwem procesów absorpcji i desorpcji.

W termoelektrycznych pompach ciepła wykorzystuje się zjawisko – tak zwany efekt Peltiera, polegające na tym, że „przepływ prądu stałego przez obwód złożony z dwóch różnych przewodników, powoduje nagrzewanie się jednej strony i ochładzanie drugiej” (Zalewski, 2001). Podstawową częścią pompy jest termoelement, złożony z dwóch gałęzi wykonanych z półprzewodników. Termoelementy są łączone w baterie.

3.2. Budowa sprężarkowej pompy ciepła i jej działanie

Podstawą działania sprężarkowej pompy ciepła jest sprężarkowy obieg termodynamiczny, wykorzystywany od lat w chłodnictwie. Obieg ten jest obiegiem zamkniętym, w którym krąży czynnik roboczy, przechodząc przez kolejne jego urządzenia: sprężarkę, parownik, skraplacz i zawór izentalpowy (rys. 1).

Zadaniem sprężarki jest sprężenie pary czynnika termodynamicznego, w efekcie czego jej temperatura rośnie. W skraplaczu para, oddając swoje ciepło wodzie



Rys 1. Schemat ideowy działania pompy ciepła

grzewczej, ulega skropleniu. W zaworze rozprężnym czynnik podlega rozprężeniu i tym samym ochłodzeniu, dzięki czemu może odebrać ciepło od dolnego źródła – zachodzi to w parowniku, czynnik przy tym odparowuje. Obieg zaczyna się od początku.

W obiegu pompy ciepła występują jeszcze dwa obiegi: obieg źródła dolnego (z niego ciepło jest pobierane) i górnego (do niego ciepło jest oddawane. Dolne źródło jest opisywane jakościowo (cechy: dostępność, korozyjność), a także ilościowo (parametry: temperatura oraz jej zmienność w czasie, zasoby energii i jej zmiany w czasie, koszty inwestycyjne i eksploatacyjne).

Dzieli się one na cztery typy urządzeń (Zawadzki, 2003):

- pompa powietrze/woda,
- pompa woda/woda,
- pompa solanka/woda,
- pompa bezpośrednio parowanie/woda.

Pompy typu powietrze/woda jako dolne źródło mogą wykorzystywać powietrze atmosferyczne lub zużyte powietrze z urządzeń wentylacyjnych (na przykład hale fabryczne, klatki schodowe, instalacje basenowe). Moc grzewcza pompy maleje jednak wraz z obniżaniem się temperatury zewnętrznej, a przy określonej minimalnej temperaturze pompa nie może być eksploatowana.

Pompy typu woda/woda. Wodę można bardzo efektywnie wykorzystywać jako źródło dolne. Należy jednak pamiętać, że jej temperatura nie powinna być niższa niż 7°C (trudne do osiągnięcia zimą w przypadku wód powierzchniowych). Natomiast wykorzystanie wód gruntowych może doprowadzić do wyczerpania warstwy wodonośnej. Ponadto istotne są parametry wody – by nie miała ona właściwości silnie korozyjnych.

W pompie ciepła solanka/woda krążenie czynnika odbierającego ciepło z dolnego źródła odbywa się w obiegu zamkniętym. Czynnik ten (solanka) jest niezamarzający, gdyż po ochłodzeniu w parowniku może mieć temperaturę poniżej 0°C.

W ostatnim typie pompy, płaski kolektor gruntowy z rur miedzianych, może być jednocześnie parownikiem – elementem obiegu termodynamicznego. Czynnik krążący w jego obrębie paruje w zetknięciu (poprzez ścianki rur) z gruntem.

Grunt to roczny zasobnik ciepła. Na pewnej głębokości występuje w nim stała temperatura, równa średniej rocznej temperaturze powietrza w danej strefie. Wykorzystanie gruntu przewyższa wykorzystanie wody gruntowej, dzięki jego dostępności oraz z uwagi na to, że jego temperatura jest wyższa od temperatury powietrza zewnętrznego. Wymiennik gruntowy może być wykonany jako poziomy – ułożony jako układ płaski szeregowy lub wężownicowy lub spiralny lub jako pionowy, zwany również sondą ziemną (Rubik, 2006).

4. Porównanie ekonomiczne wybranych źródeł ciepła

Do analizy wybrano następujące źródła ciepła: kotłownię na olej opałowy, na gaz ziemny, na pelety oraz z pompą ciepła (Topolańska, 2011).

Rozważania przeprowadzono dla budynku wielorodzinnego czterokondygnacyjnego zlokalizowanego w Opolu. Kotłownia ma zapewnić czynnik grzewczy dla instalacji c.o. oraz na cele podgrzewu ciepłej wody użytkowej. Instalacja c.o. pracuje jako ogrzewanie podłogowe i częściowo z wykorzystaniem grzejników niskotemperaturowych. Podgrzew ciepłej wody jest realizowany jako priorytetowy względem instalacji c.o. przy wzroście zapotrzebowania na moc na cele c.w.u. powyżej wartości średniej.

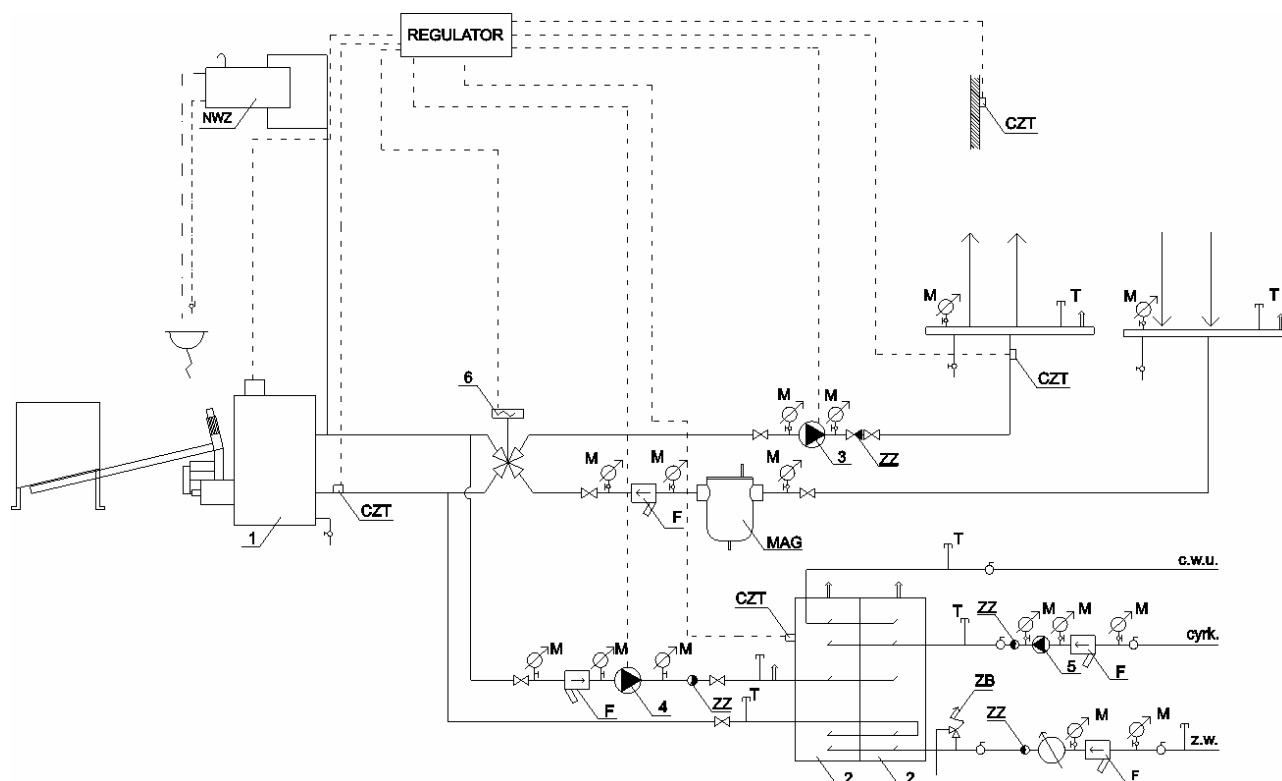
Jako punkt wyjścia zostały przyjęte następujące dane: dla instalacji c.o. – obliczeniowe parametry pracy instalacji c.o. 45/35°C, zapotrzebowanie na ciepło 50kW, spadek ciśnienia w instalacji c.o. 15 kPa, dla instalacji c.w.u. zdolność obsługi 40 osób, obliczeniowe parametry pracy instalacji c.w.u. 60/10°C, spadek ciśnienia w instalacji c.w.u. 12 kPa, jednostkowe zapotrzebowanie na c.w.u. 90 dm³/Md.

4.1. Układy technologiczne i podstawowe urządzenia w wybranych źródłach ciepła

Wśród zaprojektowanych elementów kotłowni olejowej najistotniejszymi są: kocioł olejowy firmy VIESSMANN typu Vitola 200 VB2A o maksymalnej mocy cieplnej 63 kW, palnik firmy WEISHAUPT typu WL 10/2-D wersja Z o regulacji dwustopniowej z siłownikiem, ścieżka olejowa firmy Oventrop i zbiorniki na olej (2x 1000 l) firmy WERiT, 2 podgrzewacze c.w.u. firmy VIESSMANN typu Vitocell 100-V CVA o pojemności nominalnej 300 l, naczynie wzbiorcze zamknięte firmy TERMEN typu TerNWP o poj. użytkowej 71 dm³, pojemności całkowitej 130 dm³ oraz zawór mieszający trójdrogowy, zawory bezpieczeństwa, armatura chroniąca przed zanieczyszczeniami mechanicznymi oraz pompy.

Przy kotłowni gazowej najistotniejsze elementy stanowią: kocioł firmy VIESSMANN typu VITOCROSSAL 300 CU3 o mocy cieplnej 66 kW w zestawie z palnikiem typu MatriX VGMI – 4, zblokowana dwustopniowa ścieżka gazowa typu SG2-20 o DN 20 firmy Flamagaz i System detekcji gazu Smart firmy Alter S.A.. Pozostałe elementy są takie same jak przy kotłowni olejowej. Układ technologiczny nie podlegał znacznym zmianom.

Na wyposażeniu kotłowni na pelety (rys. 2) znajdują się następujące elementy: kocioł firmy CHT Cichewicz typu Futura BIO 75 o maksymalnej mocy cieplnej 75 kW w wykonaniu specjalnym do spalania peletów + system odpielania, naczynie wzbiorcze otwarte typu A o pojemności użytkowej 27,8 dm³, pojemności całkowitej 35 dm³, mieszacz czterodrogowy firmy HONEYWELL z serii ZR GFLA o średnicy DN = 40 i siłownik VMM 20. Pozostałe elementy takie same lub analogiczne jak wcześniej. Jedyną zmianą w układzie technologicznym jest wprowadzenie zaworu czterodrogowego do zapewnienia minimalnej temperatury powrotu.



Rys. 2. Schemat kotłowni na pelety: 1 – kocioł, 2 – podgrzewacz c.w.u., 3 – pompa obiegowa, 4 – pompa ładująca c.w.u., 5 – pompa cyrkulacyjna c.w.u., 6 – zawór czterodrogowy, NZW – naczynie wzbiorcze, ZZ – zawór zwrotny, MAG – magnetoodmulacz, F – filtr, ZB – zawór bezpieczeństwa, CZT – czujnik temperatury, M – manometr, T – termometr

Układ technologiczny źródła ciepła (rys. 3) z pompą ciepła różni się znacznie od trzech poprzednich. Wynika to z konieczności zastosowania dwóch jednostek pompy ciepła. Wykorzystanie programu do doboru pomp ciepła wraz z doбором parametrów dolnego źródła ciepła i optymalizacją kosztów eksploatacyjnych firmy Danfoss zdecydowało o wyborze pompy ciepła tejże firmy i współpracujących z nią zasobników ciepłej wody użytkowej. Jako dolne źródło ciepła przyjęto pionowe odwierty gruntowe. Podgrzew ciepłej wody użytkowej odbywa się dwustopniowo, jako całkowity priorytet względem instalacji c.o. (pompa pracuje albo na cele c.o. albo na c.w.u.). W zaprojektowanym układzie znalazły się następujące elementy: 2 pompy ciepła firmy DANFOSS typu DHP – R 35 o maksymalnej mocy cieplnej 34 kW, zasobniki dwupłaszczowe c.w.u. firmy DANFOSS typu KBH 700 (o pojemności nominalnej 700 l – 1 sztuka) oraz KBH 1000 (pojemność 1000 l – 3 sztuki), naczynia wzbiorcze zamknięte firmy REFLEX typu N250, NG50 i F18 oraz firmy TERMEN typu TerNWP o pojemności całkowitej 90 dm³, zawór rozdzielający HONEYWELL z serii DR GFLA o średnicy DN= 32 z siłownikiem VMM 20, pozostałe elementy tych samych producentów jak wcześniej, lecz o innych parametrach i w większej ilości z uwagi na bardziej rozbudowany układ technologiczny. Jako źródło dolne pracować ma 9 odwiertów o głębokości 95 m.

4.2. Zestawienie nakładów inwestycyjnych

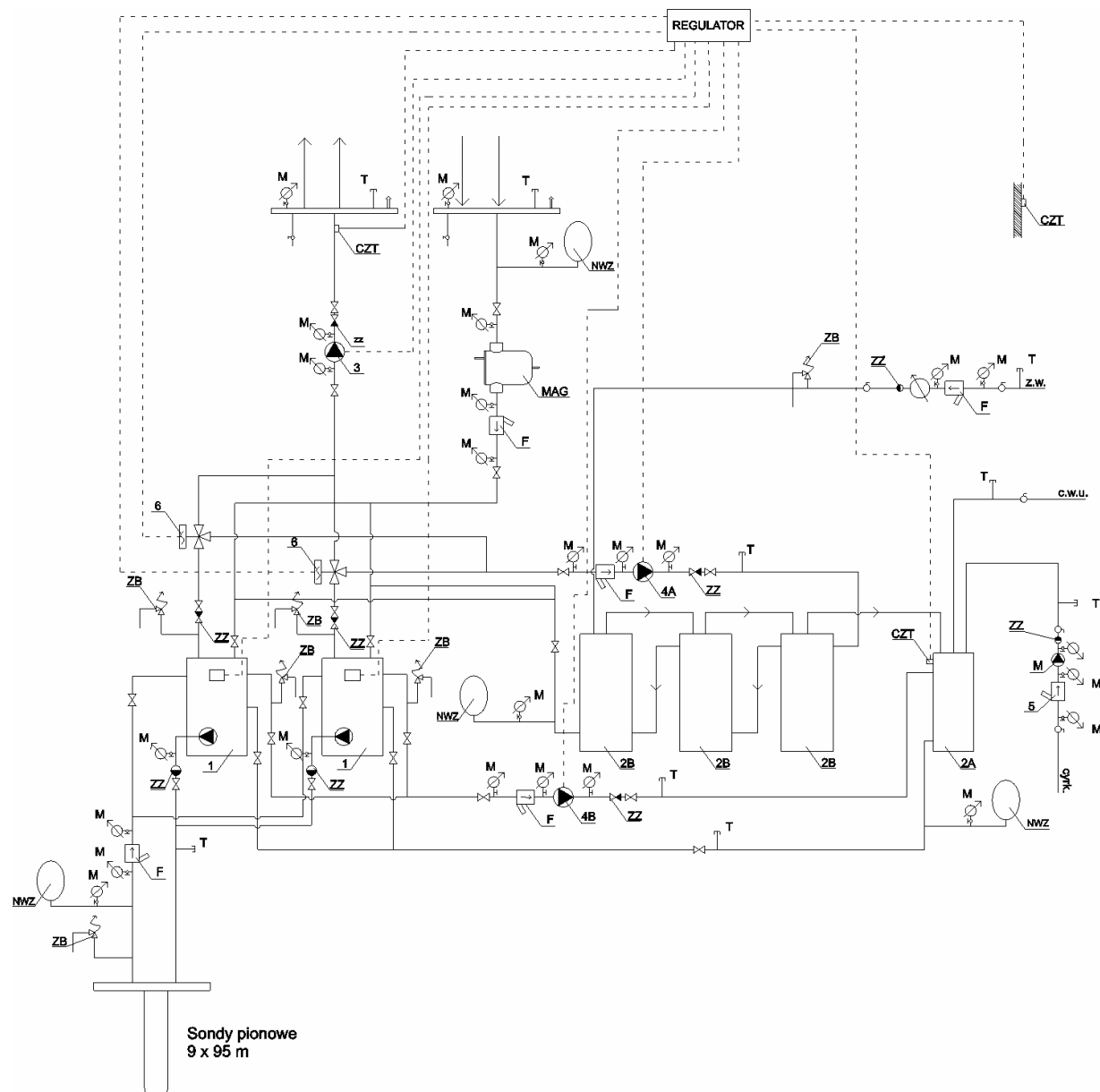
W celu określenia kosztów przyjęto następujące wielkości szacunkowe:

- koszt robocizny równy 20% wartości materiałów (M),
- koszt pośrednie równe 70% wartości robocizny (R).

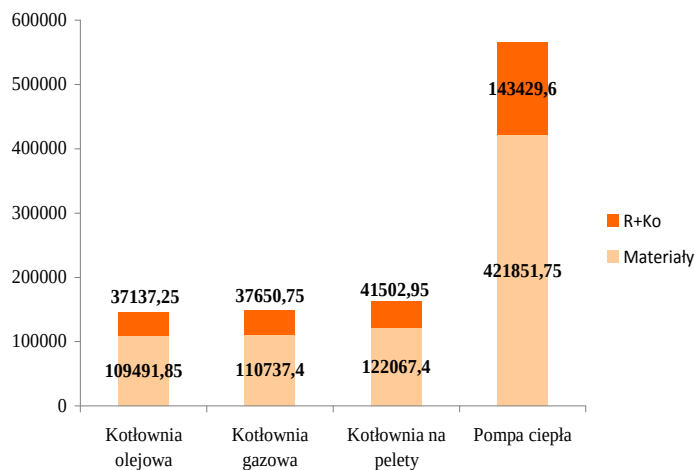
Zestawienie nakładów inwestycyjnych przedstawia tabela 1 oraz rysunki 4 i 5.

Tab. 1. Zestawienie nakładów inwestycyjnych poszczególnych źródeł ciepła

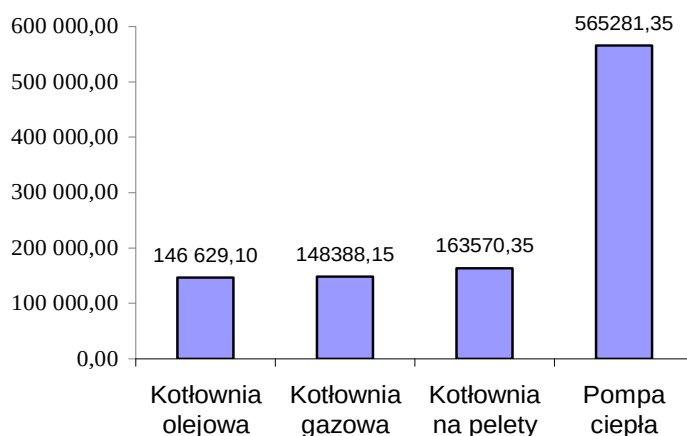
Źródło ciepła	Koszt		
	Materiały	R + Ko	Razem
Kotłownia olejowa	109 491,85 zł	37 137,25 zł	146 629,10 zł
Kotłownia gazowa	110 737,40 zł	37 650,75 zł	148 388,15 zł
Kotłownia na pelety	122 067,40 zł	41 502,95 zł	163 570,35 zł
Pompa ciepła	421 851,75 zł	143 429,60 zł	565 281,35 zł



Rys. 3. Układ technologiczny źródła ciepła z pompą ciepła: 1 – pompa ciepła, 2A – zasobnik dwupłaszczowy c.w.u. typu KBH 700 firmy DANFOSS, 2B – zasobnik dwupłaszczowy c.w.u. typu KBH 1000 firmy DANFOSS., 3 – pompa obiegowa, 4A, 4B – pompa ładujące c.w.u., 5 – pompa cyrkulacyjna c.w.u., 6 – zawór trójdrogowy, NZW – naczynie wzbiornicze, ZZ – zawór zwrotny, MAG – magnetoodmulator, F – filtr, ZB – zawór bezpieczeństwa, CZT – czujnik temperatury, M – manometr, T – termometr



Rys. 4. Zestawienie kosztów inwestycyjnych poszczególnych źródeł ciepła



Rys. 5. Zestawienie całkowitych kosztów inwestycyjnych źródeł ciepła

Wyraźnie widoczne jest, że pompa ciepła jest znacznie droższa inwestycyjnie od pozostałych źródeł ciepła. Wynika to przede wszystkim z rozbudowania układu technologicznego (2 pompy ciepła, 4 zasobniki c.w.u., 4 naczynia wzbiorcze, większa ilość zaworów bezpieczeństwa oraz armatury). Wysokie koszty generuje również wykonanie odwiertów pionowych. Pompa ciepła jest więc inwestycyjnie 3,5-krotnie droższa od pozostałych źródeł ciepła. Należy przy tym zauważyć, że wiąże się to z typem budynku. Wielorodzinny budynek, mimo iż ma dość niskie zapotrzebowanie na ciepło, wymaga zastosowania dość skomplikowanego układu technologicznego i większej ilości urządzeń. Ponadto, by dolne źródło ciepła było wydajne, należy wykonać dużą ilość odwiertów. W przypadku mniejszych budynków, jednorodzinnych, gdzie zapotrzebowanie na moc cieplną jest mniejsze, można zastosować prostsze układy z mniejszą ilością elementów składowych oraz wykonać wymiennik poziomy, który jest znacznie tańszy niż odwierty.

Koszty inwestycyjne pozostałych źródeł ciepła kształtują się na podobnym poziomie, najtańsza jest kotłownia olejowa, następnie gazowa i na pelety. Różnica pomiędzy dwiema pierwszymi jest nieznaczna.

4.3. Zestawienie kosztów eksploatacyjnych

Do porównania nakładów eksploatacyjnych wzięto jedynie koszty paliwa. Wynika to z faktu, iż koszty energii elektrycznej zużywanej przez urządzenia elektroniczne (automatykę) trudno oszacować, przy tym są one porównywalne w każdym z przypadków i mało znaczące w porównaniu do kosztów paliwa.

Cenę oleju opałowego przyjęto jako wartość średnią z okresu 01.01.2011-11.06.2011 z wartości podanych przez PKN ORLEN, średnią wyliczano z uwagi na znaczne wahania ceny oleju opałowego.

Opłata za pobór gazu została określona na podstawie taryfy gazowej dla Górnośląskiej Spółki Gazowniczej Sp. z o.o..

Cenę peletu przyjęto na podstawie ceny producenta podanej na stronie internetowej firmy Biopal (www.biopal.pl).

Zapotrzebowanie roczne na energię elektryczną uzyskano z programu HPC do doboru pomp ciepła firmy Danfoss. Koszt prądu elektrycznego obliczono na podstawie taryfy Operatora Systemu Dystrybucyjnego Energia Pro S.A. dla okręgu opolskiego. Przynależność do taryfy G-12 – odbiorcami są gospodarstwa domowe (brak prowadzenia działalności gospodarczej), taryfa dwustrefowa (strefa dzienna i nocna).

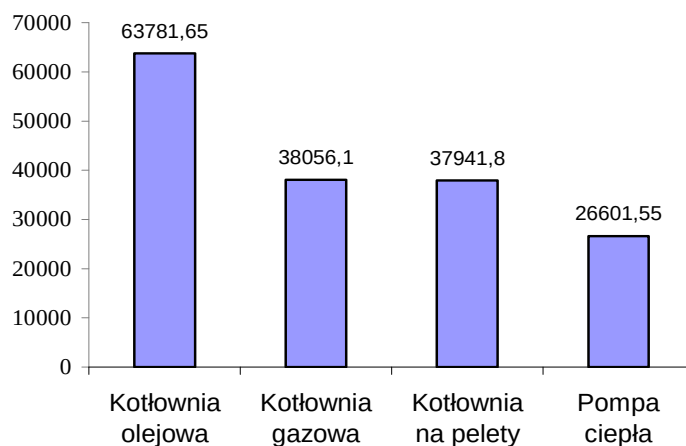
Zestawienie obliczonych rocznych kosztów eksploatacyjnych przedstawia tablica 2 oraz rysunek 6.

Tab. 2. Zestawienie kosztów eksploatacyjnych poszczególnych źródeł ciepła

Źródło ciepła	Koszt eksploatacyjny roczny
Kotłownia olejowa	63 781,65 zł
Kotłownia gazowa	38 056,10 zł
Kotłownia na pelety	37 941,80 zł
Pompa ciepła	26 601,55 zł

Okazuje się, iż pompa ciepła jest najtańszym eksploatacyjnie źródłem ciepła. Koszty w przypadku kotłowni gazowej i na pelety są o około 50% wyższe, zaś przy olejowej o około 140%. Nawet przy dość wysokich cenach energii elektrycznej, pompa ciepła pozwala na uzyskanie dużych oszczędności. Możliwość wykorzystania darmowej energii z natury przynosi wymierne korzyści finansowe. Ważna jest kwestia zoptymalizowania doboru urządzenia tak, aby roczne zużycie energii było jak najniższe, a wskaźnik efektywności był tym samym jak najwyższy.

Wśród pozostałych źródeł ciepła, właściwie równorzędne koszty wywołują kotłownia gazowa i na pelety. Korzystniejsza jest ta pierwsza, z uwagi na niższe nakłady inwestycyjne. Niekorzystnie wypada w tym przypadku kotłownia olejowa, z uwagi na wysoką cenę oleju opałowego (pomimo niskiego zapotrzebowania wynikającego z wysokiej wartości opałowej).



Rys. 6. Zestawienie kosztów eksploatacyjnych poszczególnych źródeł ciepła

5. Podsumowanie

Wybierając źródło ciepła dla danego budynku, należy rozważyć wiele aspektów. W analizowanym przypadku budownictwa wielorodzinnego okazało się, że źródło ciepła, które jest najtańsze inwestycyjnie, generuje największe koszty eksploatacyjne. Źródło, które zapewnia najwyższe oszczędności eksploatacyjne, jest niezwykle drogie przedsięwzięciem inwestycyjnym. Rozważany przypadek pokazał, że pompa ciepła jest najdroższą inwestycją. Rozbudowany układ technologiczny i kosztowna instalacja dolnego źródła ciepła powodują, że niskie koszty eksploatacyjne i tym samym znaczne oszczędności finansowe nie mają możliwości szybkiego zrekompensowania wysokich nakładów inwestycyjnych. Jest to lepsze rozwiązanie dla mniejszych kotłowni, przy budynkach jednorodzinnych, gdzie nakłady mogą zwrócić się szybciej.

Literatura

- Gradziuk P., Grzybek A., Kowalczyk K., Kościuk B. (2003). *Biopaliwa. Wieś Jutra*, Warszawa.
- Koczyk H. (2009). *Ogrzewnictwo praktyczne. Projektowanie, montaż, certyfikacja energetyczna, eksploatacja. Systherm Serwis*, Poznań.
- Mizielińska K., Olszak J. (2005). *Gazowe i olejowe źródła ciepła małej mocy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.

Nantka M. B. (2006). *Ogrzewnictwo i ciepłownictwo, Tom I. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.

Pisarek M., Hunder M. (2002). Wykorzystanie biopaliw stałych na cele energetyczne w Polsce – stan rozwoju, przykłady, perspektywy. W: *Odnawialne źródła energii: biomasa i pompy ciepła. Stowarzyszenie „Uroczysko”*, Supraśl, 11-24.

Rubik M. (2006). *Pompy ciepła: poradnik. Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”*, Warszawa.

Topolańska J. (2011). *Analiza techniczno-ekonomiczna wybranych źródeł ciepła w budynku wielorodzinnym. Praca magisterska, Politechnika Białostocka*.

Zalewski W. (2001). *Pompy ciepła: sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne. Podstawy teoretyczne. Przykłady obliczeniowe. Inżynierskie Przedsiębiorstwo Produkcyjno-Usługowe Masta*, Gdańsk.

Zawadzki M. (2003). *Kolektory słoneczne, pompy ciepła na tak. Polska Ekologia*, Warszawa.

HEAT PUMP COMPARED TO OTHER HEAT SOURCES IN THE CASE OF MULTI-FAMILY BUILDINGS

Abstract: The paper presents a characteristics of fuels and heat sources. Special concern was applied to heating with a heat pump. The economic and technical analysis of the use heat pump in multi-family building was performed. The heat pump was compared with another alternatives: heating oil, natural gas and pellets. For each systems of heat sources the total investment and operating costs were calculated. The heat pump had the least operating cost but the high investment cost.

ANALIZA PRZEPŁYWÓW W INSTALACJACH WODOCIĄGOWYCH W OBIEKTACH HOTELOWYCH

Piotr Krzysztof TUZ, Joanna GWOŹDZIEJ-MAZUR*

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

Streszczenie: W Polsce od lat podejmowana jest dyskusja związana ze spadkiem zużycia wody w obiektach zabudowy jednorodzinnej oraz wielorodzinnej. Struktura zużycia wody w tych obiektach jest obecnie dobrze scharakteryzowana, zaś w obiektach użyteczności publicznej pozostawia wiele pytań do wyjaśnienia. W referacie przedstawiono wyniki badań zużycia wody w obiektach hotelowych. Przedstawiono szczegółową strukturę zużycia wody. Zaprezentowano wykresy pozwalające na określenie przepływów maksymalnych i minimalnych, które mają bezpośrednie przełożenie na dobór urządzenia pomiarowego, na podstawie którego obliczane są opłaty za wodę.

Słowa kluczowe: zużycie wody, wodomierz, przepływ maksymalny, przepływ minimalny.

1. Wprowadzenie

Obliczanie zapotrzebowania na wodę oraz dobór urządzeń pomiarowych opiera się głównie o obowiązujące rozporządzenia i normy techniczne. Akty prawne często nie odzwierciedlają rzeczywistej sytuacji zużycia wody, co w konsekwencji powoduje przewymiarowanie instalacji, jak również nieprawidłowy dobór urządzenia pomiarowego.

W roku 2002 zostało wydane Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody (Dz. U. nr 8 z 2002r, poz. 70). Obecnie dla wielu przedsiębiorstw wodociągowych stanowi ono podstawę do określenia zużycia wody w przypadku uszkodzenia urządzenia pomiarowego, bądź też wadliwej jego pracy. Wyciąg z rozporządzenia przedstawiono poniżej w tabeli 1.

Na wartość zapotrzebowania na wodę istotny wpływ ma standard oraz wielkość danego obiektu. Chodzi głównie o liczbę oraz rodzaj urządzeń sanitarnych montowanych w tych obiektach (Chudzicki i Sosnowski, 2005). Zatem warto przyrzeć się, jak również dokonać porównania wymienionych wartości zapotrzebowania na wodę z rzeczywistymi, aktualnymi danymi uzyskanymi z analizy danych z przeprowadzonego monitoringu. Typy monitorowanych obiektów przedstawiono w tablicy 1.

Tab. 1. Przeciętne normy zużycia wody w obiektach usługowych (Dz. U. nr 8 z 2002r, poz. 70)

Rodzaj zakładu	Jednostka odniesienia (j.o.)	Przeciętne normy zużycia wody	
		dm ³ /j.o. × doba	m ³ /j.o. × miesiąc
Hotele i motele kat lux.(*****)	1 miejsce noclegowe	200	6,0
Hotele i motele kat lux.(*****)			
z zapleczem gastronomicznym		250	7,5
Hotele kat (****)		150	4,5
Hotele kat (***)		100	3,0
Hotele pozostałe		80	2,4

2. Metodyka badań

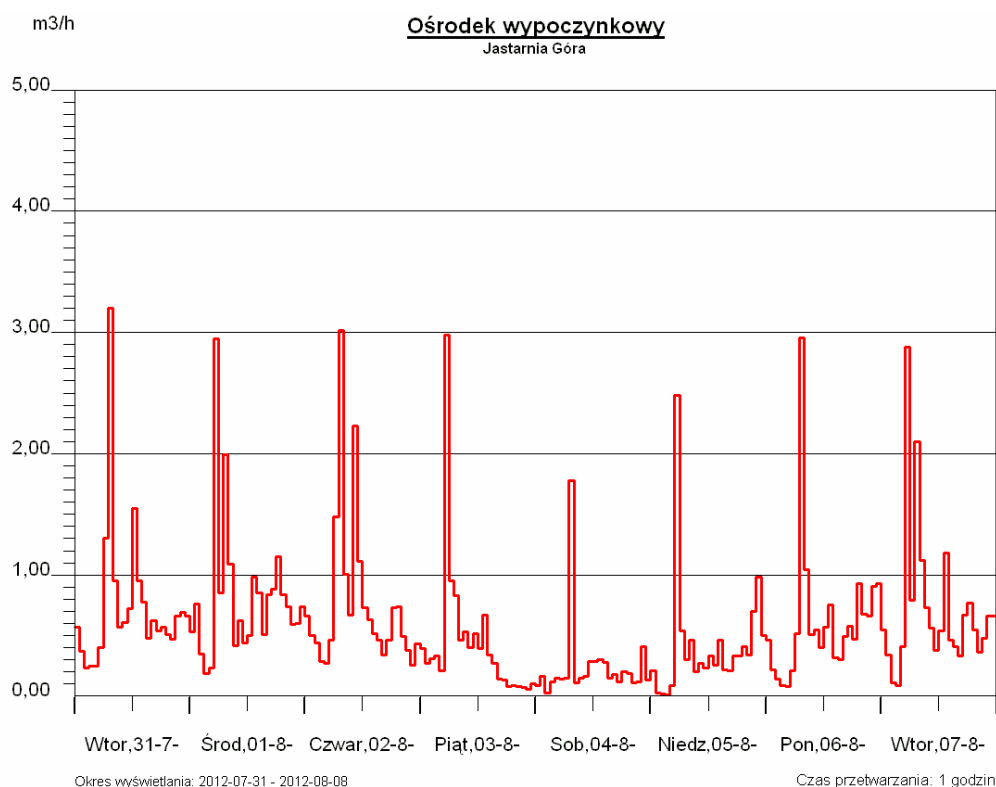
Przedmiotem wykonanych badań było określenie rzeczywistego zużycia wody wodociągowej w obiektach użyteczności publicznej. Dane na ten temat uzyskano za pomocą rejestratorów cyfrowych podłączonych do wodomierzy głównych. Zasady rejestracji szczegółowo zostały opisane przez Czeszczewika i Tuza (2009) oraz Tuza i in. (2009a i b). Obszarem objętym badaniami były hotele zlokalizowane na terenie Polski o liczbie miejsc noclegowych nie przekraczających 100. Analizie poddano 9 hoteli o zbliżonym standardzie wyposażenia. Podczas rejestracji danych zastosowano dziesięć

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.mazur@pb.edu.pl

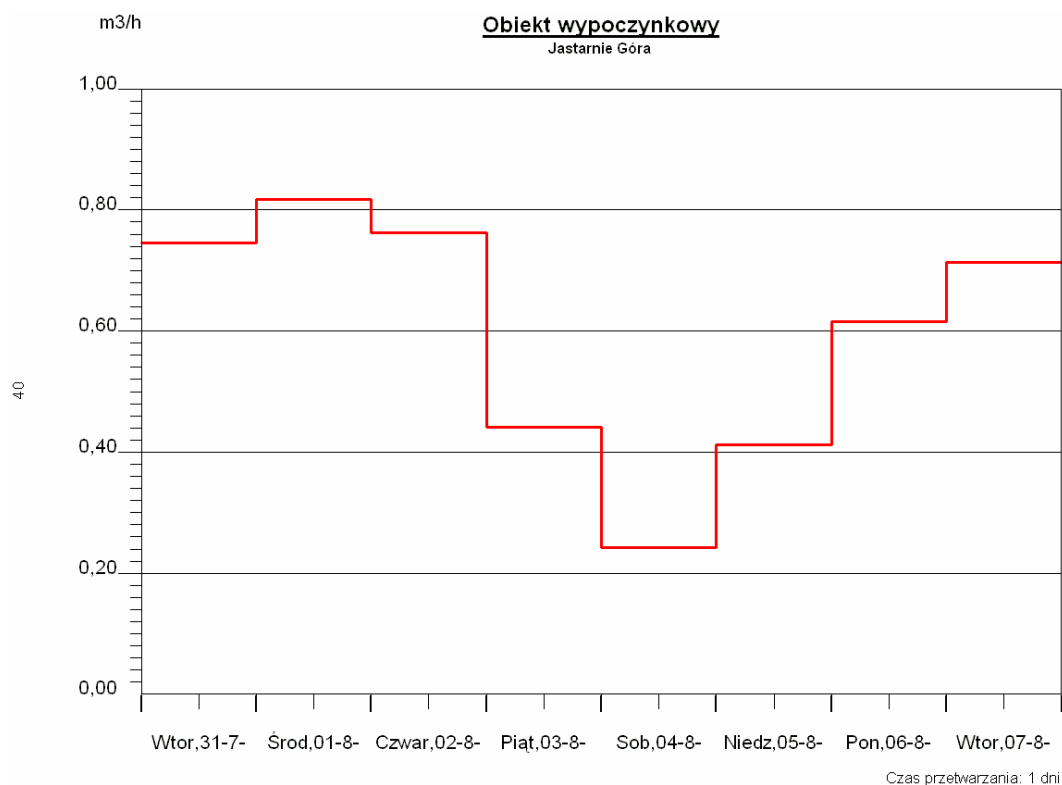
i stulitrowe impulsowanie. Zebrane wyniki pozwoliły na dokładne przyjrzenie się strukturze rozbioru wody, jak również określenie wskaźników średniego, maksymalnego i minimalnego dobowego zapotrzebowania na wodę.

Przykładowe wykresy rejestracji cyfrowej zużycia godzinowego wody przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

Do analizy danych uzyskanych podczas monitorowania wykorzystano głównie program STATISTICA oraz program Excel.



Rys. 1. Wykres rejestracji cyfrowej zużycia godzinowego wody w badanym obiekcie – ośrodek wypoczynkowy



Rys. 2. Wykres rejestracji cyfrowej zużycia godzinowego wody w badanym obiekcie – ośrodek wypoczynkowy

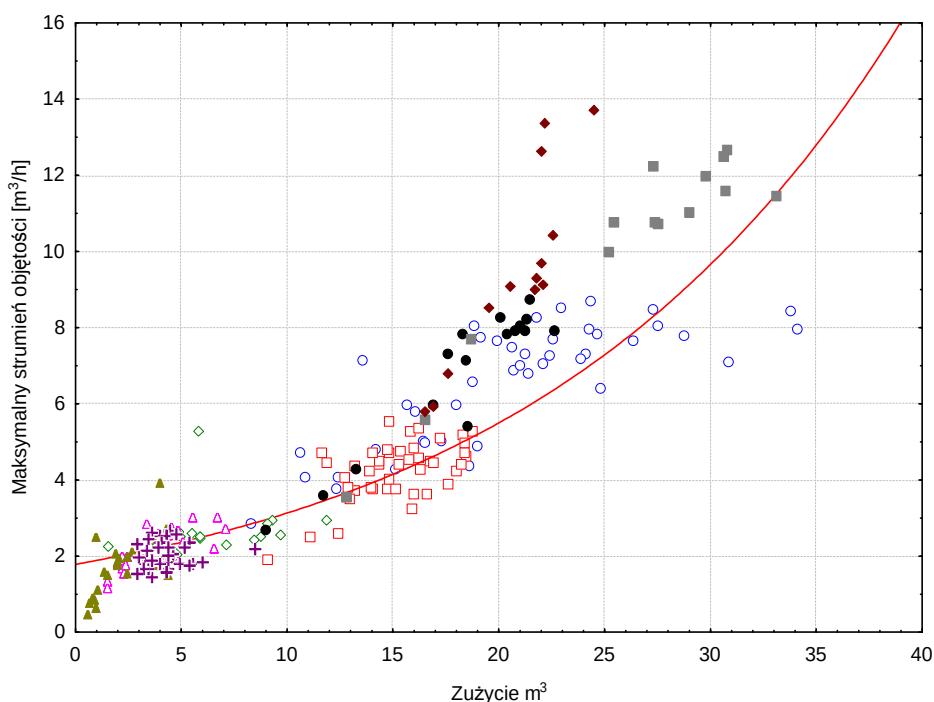
3. Analiza wyników badań

Przy doborze urządzenia pomiarowego najważniejsze jest ustalenie zakresu pracy wodomierza, a więc ustalenie przepływu minimalnego i maksymalnego w obiekcie oraz powiązanie go z jego wielkością charakteryzowaną na przykład liczbą punktów czerpalnych, zużyciem dobowym wody, itp. Dane te pozwalają na potwierdzenie poprawności doboru urządzenia pomiarowego oraz weryfikacji przepływu dla obiektów użytkowanych. Wykresy obrazujące omówione przepływy w zależności od zużycia wody w okresie monitorowania przedstawiono na rysunkach 3, 4 i 5.

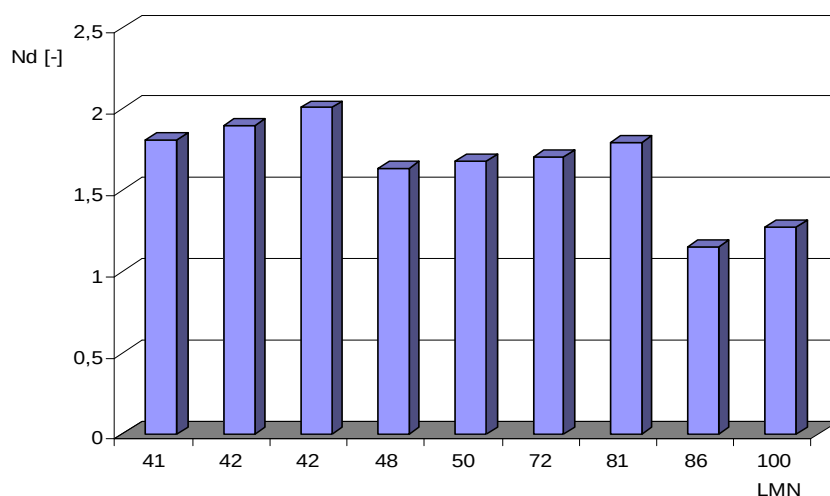
Dokonano próby określenia współczynników zarówno nierównomierności dobowej, jak również godzinowej.

Wyznaczone w warunkach rzeczywistych współczynniki mogą być wykorzystane do określenia przepływów w nowo projektowanych instalacjach wodociagowych, co w konsekwencji przekłada się na dobór średnic przewodów instalacji wodociagowej w nowo powstającym budynku obiektu hotelowego. Z badań na określonej grupie wynika, iż współczynnik nierównomierności dobowej waha się w granicach od 1,15 do 2,0. Wykres wartości współczynnika N_d wyznaczonego w każdym badanym obiekcie przedstawiono na rysunku 4.

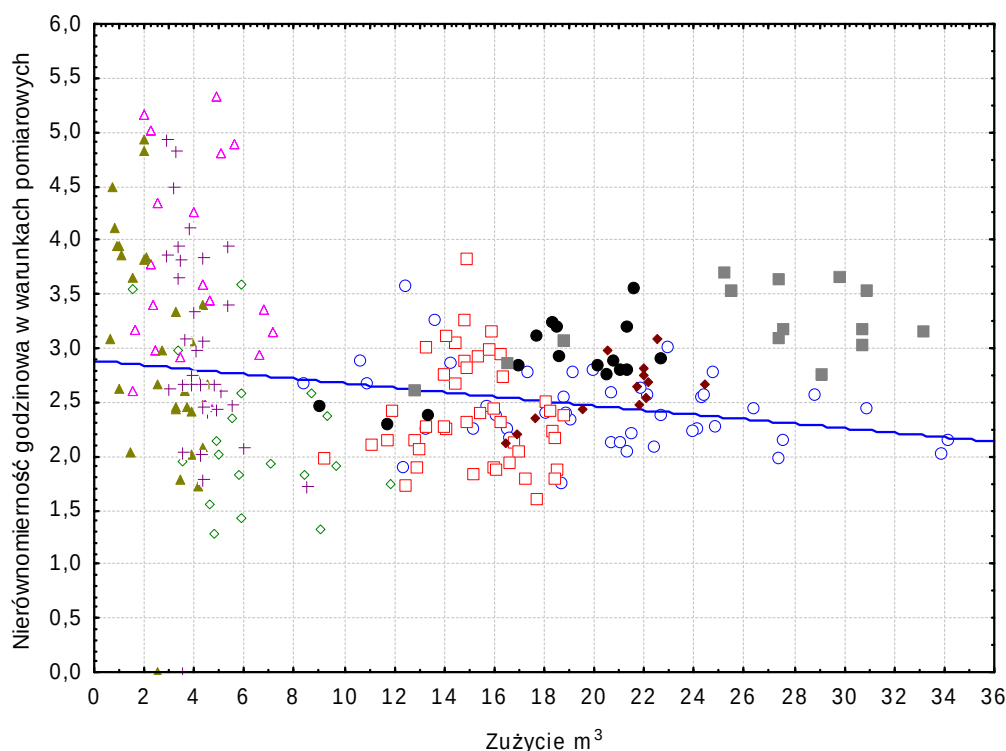
Ponadto wyznaczono nierównomierność godzinową w warunkach pomiarowych i odniesiono ją do wartości zużycia dobowego.



Rys. 3. Przepływ maksymalny w zależności od zużycia wody w badanych obiektach



Rys. 4. Wartość współczynnika nierównomierności dobowej wyznaczona w pojedyńczym badanym obiekcie (LMN – liczba miejsc noclegowych)



Rys. 5. Nierównomierność godzinowa w funkcji zużycia wody w badanych obiektach

Dla zobrazowania zużycia wody wybrano charakterystyczne przedziały dla różnych typów i klas wodomierzy. Wyniki uzyskane w oparciu o monitoring przedstawiono w tabeli 2.

Z analizy danych pomiarowych wynika, że największe obciążenie pracy wodomierzy następuje w przedziale strumienia objętości 0,1-0,45 m³/h, zaś najmniejsze w przedziale powyżej 6 m³/h. Tak przeprowadzona

analiza może być pomocna do oszacowania rozbiórów wody w nowo powstających budynkach o zbliżonej liczbie miejsc noclegowych, nieprzekraczających stu. Wiedza określająca przedział, w którym następuje największy rozbiór wody może być pomocna na etapie doboru urządzenia pomiarowego oraz średnic przewodów w omawianej grupie budynków.

Tab. 2. Zużycie wody w poszczególnych przedziałach

Przedziały strumienia objętości [m ³ /h]	Zużycie wody [%]					
	0-0,05	0,05-0,1	0,1-0,45	0,45-0,8	0,8-6,0	6,0-15,0
H1	0,24	1	7,62	11,34	79,8	0
H2	0,04	6,98	44,98	20,63	27,37	0
H3	4,33	0,9	78,58	12,44	3,75	0
H4	49,5	16,39	23,18	6,63	4,31	
H5	6,205	9,09	33,605	20,085	12,273	0,015
H6	2,23	8,78	30,37	20,83	0,346	0,031
H7	5,662	7,595	31,6775	17,9875	27,068	0,635
H8	48,99	18,15	27,84	3,34	1,08	0
H9	37,65	17,68	33,1	8,31	3,25	0

4. Podsumowanie

Skalę zmienności zapotrzebowania na wodę wodociagową w cyklu rocznym, dobowym i godzinowym charakteryzują odpowiednie współczynniki nierównomierności. W celu określenia zapotrzebowania na wodę należy uwzględnić wartości wskaźników. W artykule określone zostały, na podstawie szczegółowej analizy danych rzeczywistych, zarówno współczynniki nierówno-mierności dobowej (N_d), jak i nierównomierności godzinowej (N_h). Podano rozkład strumienia objętości wody mierzonej w różnych zakresach pomiarowych, charakteryzujące odpowiednie przepływy danej wielkości i klasy wodomierzy, które mogą być uwzględnione do oszacowania strat pozornych.

Prawidłowy dobór wodomierzy, przy obecnej liczbie proponowanych urządzeń na rynku, może okazać się dość trudną sprawą. Z doświadczeń projektantów, jak również eksploataatorów urządzeń pomiarowych wynika, iż stosowanie metod matematycznych i statystycznych w przypadku istniejących już budynków pozwala na sprawdzenie poprawności doboru wodomierzy, zaś dla budynków nowo powstających wyniki z przeprowadzonych badań są bazą do poprawnego ich doboru. Należy pamiętać, że pomiar objętości zużywanej wody jest podstawą wymiarowania nie tylko urządzeń wodociagowych, ale również kanalizacyjnych i oczyszczalni ścieków, stąd błędy popełnione przy doborze wodomierza przenoszą się wprost na pozostałe dziedziny działalności przedsiębiorstw wodociagowych.

Literatura

- Chudzik J., Sosnowski S. (2005). Instalacje wodociagowe – projektowanie, wykonawstwo, eksploatacja. Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa.
- Czeszczewik D., Tuz P. (2009). Dobór i eksploatacja wodomierzy. *Rynek Instalacyjny*, 5/2009, 35-38.
- Tuz P., Czeszczewik D., Sokołowski P., Smilewicz R. (2009a). Dobór i eksploatacja wodomierzy. Wybór typu licznika. Cz.1. *Rynek Instalacyjny*, 9/2009, 54-59.
- Tuz P., Czeszczewik D., Sokołowski P., Smilewicz R. (2009b). Dobór i eksploatacja wodomierzy. Wybór typu licznika. Cz.2. *Rynek Instalacyjny*, 10/2009, 93-96.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 roku w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody (Dz. U. nr 8 z 2002 r., poz. 70).

ANALYSIS OF FLOW IN WATER SUPPLY SYSTEMS IN HOTEL BUILDINGS

Abstract: There is discussion in Poland undertaken about decrease in water consumption in single-family housing facilitates as well as multi-family buildings. The structure of water consumption is well described in these facilities, but on the other hand there are many issues to clear regarding public buildings. The report presents outcomes of research on the water consumption in public buildings (hotels). The study presents detailed structure of water consumption, as well as graphs aimed at max and min level of water flow definition in buildings in question, which directly influences on a proper measuring device selection/choice, on the basis of which water charges are calculate.

Badania wykonano w ramach pracy statutowej S/WBIS/2/2011.

WODOMIERZE JEDNOSTRUMIENIOWE KLASY B-H PO 5 LATACH EKSPLOATACJI W SIECI WODOCIĄGOWEJ

Piotr Krzysztof TUZ*, Joanna GWOŹDZIEJ-MAZUR

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

Streszczenie: Wodomierz w przedsiębiorstwie wodociągowym jest obecnie podstawowym urządzeniem do pomiaru zużycia wody, zarówno wtłoczonej do sieci, jak i u końcowego odbiorcy. Najliczniejszą grupę stanowią urządzenia w średnicach DN 15 i DN 20. Coraz częściej przedsiębiorstwa wodociągowe dla ograniczenia strat wody decydują się na zakup i montaż w sieci wodociągowej wodomierzy klasy C. Wybór typu wodomierza powinien być uzależniony między innymi od jakości wody w sieci. Wodomierze jednostrumieniowe klasy B są lub były w wielu przedsiębiorstwach wodociągowych głównym urządzeniem pomiarowym. Okres pracy wodomierzy w sieci (okres między legalizacjami) wynosi w Polsce 5 lat. W artykule przedstawiono badania właściwości metrologicznych wodomierzy jednostrumieniowych suchobieżnych klasy B po 5 latach eksploatacji w sieciach wodociągowych w różnych przedsiębiorstwach wodociągowych.

Słowa kluczowe: wodomierz, eksploatacja sieci wodociągowej, urządzenie pomiarowe.

1. Wprowadzenie

Problem strat wody występuje praktycznie we wszystkich sieciach wodociągowych na świecie i stanowi często duży problem. W Polsce skala tego problemu uwidoczniła się dopiero w okresie gospodarki rynkowej. Dawniej, na skutek niskiej ceny wody występowało niewłaściwe jej gospodarowanie, co przyczyniło się do jej marnotrawienia i nie przywiązywania uwagi do strat powstających w trakcie użytkowania. Za IWA (*International Water Association*) straty można podzielić na rzeczywiste i pozorne. Straty pozorne rzadziej prezentowane w literaturze są przeważnie utożsamiane z wyborem nieodpowiedniej wielkości urządzenia pomiarowego.

Według IWA (Speruda, 2007) wodę wprowadzoną do sieci dzieli się na dwa rodzaje: wodę zużytą na konsumpcję i straty. Kolejnych podziałów wody konsumowanej (tab. 1) dokonuje się w oparciu o sposób jej rozliczania i obecność przyrządów pomiarowych. Wodę wtłoczoną do sieci wodociągowej podzielono na autoryzowaną konsumpcję i straty. Całkowite straty wody to różnica pomiędzy zmierzoną objętością wody wprowadzoną do sieci wodociągowej a zafakturowaną objętością wody dostarczoną odbiorcom. Straty te z kolei podzielono na straty rzeczywiste i pozorne. Straty rzeczywiste to te, które powstają:

- w stacjach pomp,
- w urządzeniach do uzdatniania wody,
- w zbiornikach wody,
- w sieciach wodociągowych wraz z uzbrojeniem,
- w wewnętrznych instalacjach wodociągowych.

Większość tych strat powstaje w wyniku nieszczelności przewodów i uzbrojenia sieci wodociągowej lub awarii przewodów.

Na straty pozorne składa się nieautoryzowana konsumpcja – na przykład kradzieże oraz straty powstające w wyniku błędnych pomiarów i odczytu wodomierzy (Czeszczewik i Tuz, 2009). Przyczyn błędów wskazań wodomierzy należy upatrywać w:

- konstrukcji (budowie) wodomierza (w tym materiałów, z których jest wykonany),
- twardości i korozyjności wody w sieci wodociągowej (u końcowego odbiorcy),
- zawartości żelaza i manganu w wodzie z sieci wodociągowej (u końcowego odbiorcy),
- wieku i materiału, z którego wykonana jest sieć wodociągowa,
- liczbie awarii na sieci i częstotliwości jej płukania,
- średnicy wodomierza i doborze do warunków panujących na podłączeniu wodociągowym (przepływy charakterystyczne),

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: p.tuz@pb.edu.pl

Tab. 1. Tworzenie bilansu wody według International Water Association (Speruda, 2007)

Woda wtłoczona do systemu wodociągowego (w tym import)	Autoryzowana konsumpcja	Zafakturowana autoryzowana konsumpcja	Zafakturowana zmierzona konsumpcja (zawierająca wodę eksportowaną)	Woda przynosząca dochód
			Zafakturowane i niepomierzone zużycie (na przykład klienci ryczałtowi)	
		Niezafakturowana autoryzowana konsumpcja, na przykład woda zużyta do płukania sieci	Niezafakturowana zmierzona konsumpcja	
			Niezafakturowana i niezmierną konsumpcja	
		Straty pozorne	Nieautoryzowana konsumpcja (na przykład kradzieże)	Woda nieprzynosząca dochodu
			Błąd pomiaru i odczytu wodomierzy	
Straty wody			Straty na sieci przemysłowej i rozdzielczej	
		Straty rzeczywiste	Straty na zbiornikach magazynujących wodę	
			Straty na przyłączach	

- położeniu w stosunku do źródła wody,
- występowaniu uderzeń hydraulicznych,
- sposobie montażu,
- wyborze klasy metrologicznej urządzenia.

Straty te szacuje się na poziomie nawet do 10% objętości wody wtłoczonej do systemu wodociągowego.

W zmianie do Dyrektywy 2004/22/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 31 marca 2004 r. w sprawie przyrządów pomiarowych (zmiana 2009/137/WE z 10 listopada 2009 roku) możemy przeczytać, iż błędy wodomierza nowego, jak i w eksploatacji nie powinny faworyzować żadnej ze stron umowy na dostarczanie wody i odprowadzanie ścieków. Dotyczy to sytuacji, gdy regulujemy błędy nowego wodomierza przy wykonaniu legalizacji pierwotnej, jak i urządzenia eksploatowanego w sieci wodociągowej. Typ urządzenia wybrany w danym przedsiębiorstwie wodociągowym powinien zabezpieczać obie strony umowy przed przekroczeniem błędów granicznych dopuszczalnych przez cały okres legalizacyjny. Zmiana dyrektywy znalazła swoje odzwierciedlenie w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 16 sierpnia 2010 roku o zmianie do rozporządzenia w sprawie zasadniczych wymagań dla przyrządów pomiarowych (Dz. U. nr 163 z 2010 r., poz. 1103). Za zasadne wydaje się więc postawienie pytania o zmianę właściwości metrologicznych urządzeń w czasie ich eksploatacji, na przykład po okresie 5 lat, czyli ważności legalizacji, w zależności od typu i wielkości urządzenia pomiarowego oraz warunków pracy.

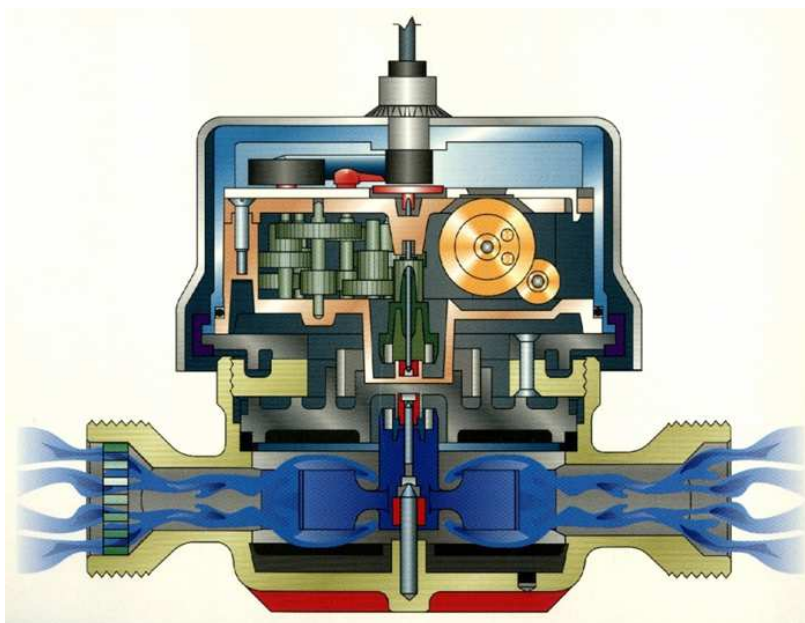
2. Metodyka badań

Celem badań jest sprawdzenie metrologii wodomierzy jednostrumieniowych klasy B po 5 latach eksploatacji i jej wpływu na bilans strat wody w sieciach wodociągowych. Zakres badań obejmował sprawdzenie metrologiczne wodomierzy zdjętych z kilkudziesięciu przedsiębiorstw wodociągowych w Polsce.

Przebadano wodomierze następujących producentów: Minol, Powogaz, Metron, Actaris, Sensus, Fila, Mirometr, ABB/Elster. Wszystkie wodomierze zostały przebadane pod względem metrologicznym na stołach legalizacyjnych zatwierdzonych przez Główny Urząd Miar i posiadających ważną dokumentację stanowiska.



Rys. 1. Wodomierz jednostrumieniowy suchobieżny – komora pomiarowa



Rys. 2. Wodomierz jednostrumieniowy– przekrój (www.sensus.com)

3. Kryteria oceny

Przyjęto, iż w badaniach obowiązują znane z przepisów prawnych kryteria dla oceny metrologii wodomierzy nowych i w użytkowaniu:

- błąd graniczny dopuszczalny (MPE) dodatni lub ujemny, objętości dostarczanych przy strumieniach objętości pomiędzy pośrednim strumieniem objętości Q_t (włącznie) a maksymalnym strumieniem objętości Q_{max} wynosi:
 - $\pm 2\%$ dla wody o temperaturze $< 30^\circ\text{C}$,
 - $\pm 3\%$ dla wody o temperaturze $> 30^\circ\text{C}$,
- błąd graniczny dopuszczalny dodatni lub ujemny, objętości dostarczanych przy strumieniach objętości pomiędzy minimalnym strumieniem objętości (Q_{min}) i pośrednim strumieniem objętości (Q_t) (wyłączenie) wynosi 5% niezależnie od temperatury wody.

W Polsce podczas sprawdzania wodomierzy w eksploatacji obowiązują błędy graniczne w użytkowaniu – podwójne w stosunku do błędów dla legalizacji pierwotnej i ponownej. Błąd graniczny dopuszczalny (MPE) dodatni lub ujemny, objętości dostarczanych przy strumieniach objętości pomiędzy pośrednim strumieniem objętości (Q_t) (włącznie) a przeciążeniowym strumieniem objętości (Q_{max}) wynosi:

- $\pm 4\%$ dla wody o temperaturze $< 30^\circ\text{C}$,
- $\pm 6\%$ dla wody o temperaturze $> 30^\circ\text{C}$,

Błąd graniczny dopuszczalny dodatni lub ujemny, objętości dostarczanych przy strumieniach objętości pomiędzy minimalnym strumieniem objętości Q_1 (Q_{min}) i pośrednim strumieniem objętości Q_2 (Q_t) (wyłącznie) wynosi $+10\%$ niezależnie od temperatury wody.

Jeśli na wniosek odbiorcy wody wykonano ekspertyzę wodomierza i nastąpiło przekroczenie błędów granicznych dopuszczalnych w użytkowaniu rozpoczyna się procedura korekty naliczonych opłat.

4. Analiza wyników badań

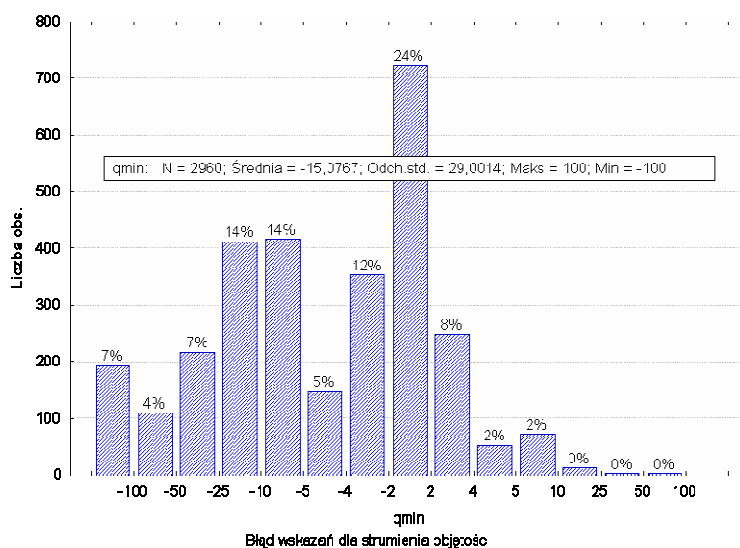
Rozkład błędów metrologicznych wodomierzy przeprowadzono w oparciu o zatwierdzenie typu tych urządzeń dla charakterystycznych strumieni objętości: $Q_n = 1,5$ (2,5) m^3/h , $Q_t = 120$ L/h (200)l/h, $Q_{min} = 30$ (50) L/h.

W wyniku przeprowadzonej analizy wodomierzy jednostrumieniowych klasy B DN 15 i 20 stwierdzono, iż w populacji wodomierzy 51% nie mieściła się w błędach pierwotnych, a 33% nie mieściła się w błędach granicznych dopuszczalnych w eksploatacji – użytkowych dla przepływu minimalnego. Średni błąd przebadanej populacji wodomierzy o średnicy nominalnej DN 15-20 dla przepływu minimalnego wynosi $-15,07\%$ i nie mieści się w błędzie granicznym dopuszczalnym dla tego strumienia objętości (tab. 2 i rys. 3).

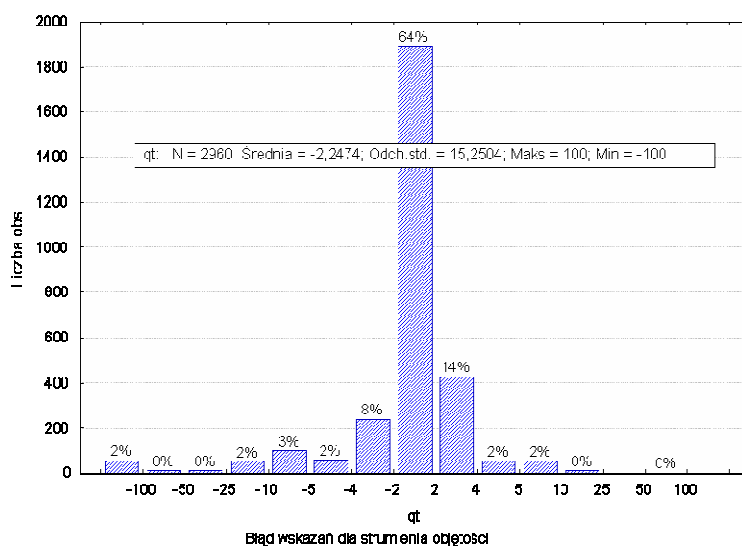
Dla parametru przepływu przejściowego Q_t zanotowano 14% wodomierzy z błędem przekraczającym maksymalny błąd graniczny dopuszczalny w użytkowaniu. W granicach błędu pierwotnego mieściło się 64% przebadanych wodomierzy (tab. 2 i rys. 4). Średni błąd dla przepływu przejściowego w analizowanej próbie wynosi $-2,24\%$ i nie mieści się w granicach błędu pierwotnego.

Dla parametru przepływu nominalnego Q_n poza zakresem dopuszczalnego błędu granicznego w użytkowaniu, czyli przedziału $<-4\%, 4\%>$ znalazło się 12% badanych wodomierzy. Stwierdzono, iż 67% populacji mieści się w granicach błędu pierwotnego dla tego strumienia objętości (tab. 2 i rys. 5). Średni błąd dla przepływu nominalnego w analizowanej próbie wynosi $-1,74\%$ i mieści się w granicach błędu pierwotnego.

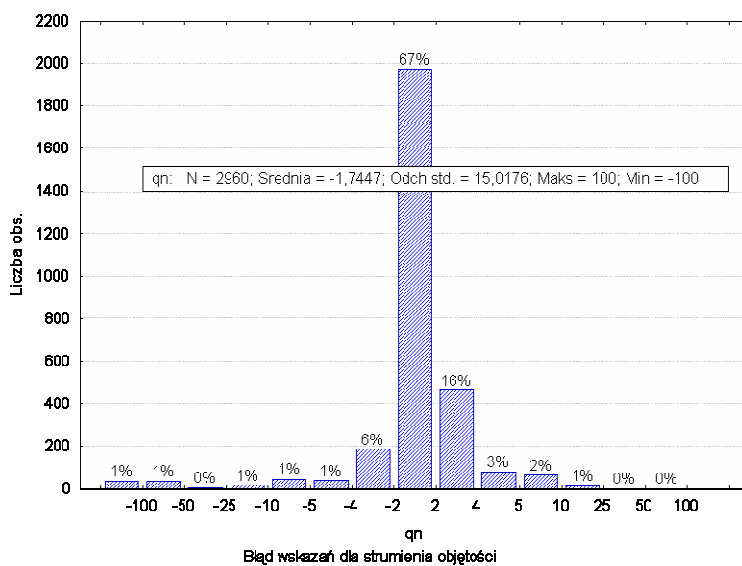
Przeprowadzono również analizę rozrzutu wyników ze względu na objętość wody w m^3 użytkowanych wodomierzy i z podziałem na producentów urządzeń (rys. 6-8).



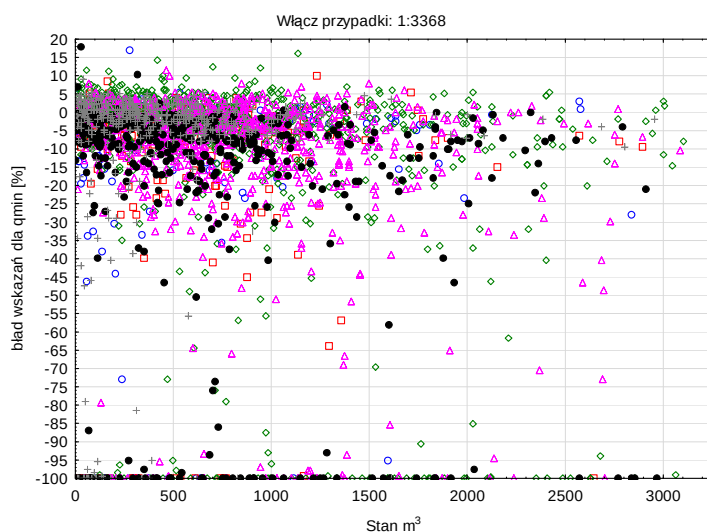
Rys. 3. Rozkład błędów dla strumienia objętości Qmin



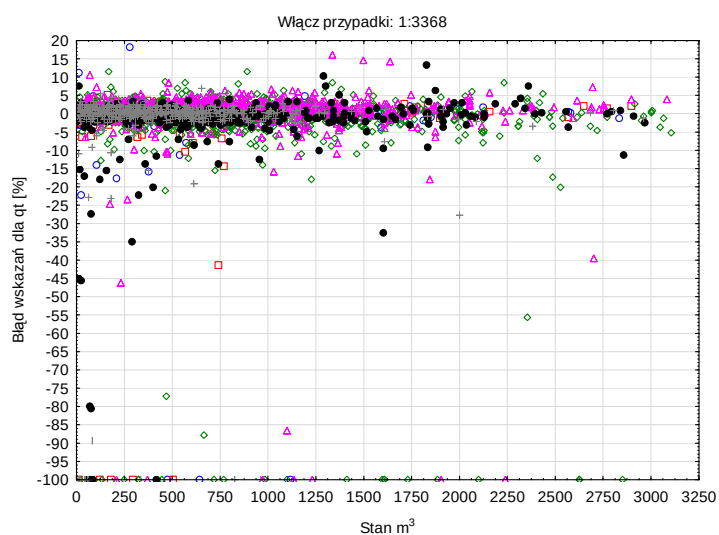
Rys. 4. Rozkład błędów dla strumienia objętości Qt



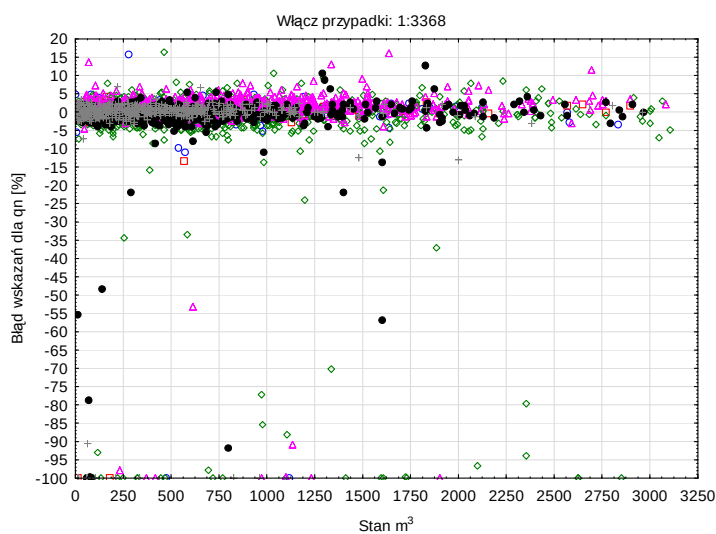
Rys. 5. Rozkład błędów dla strumienia objętości Qn



Rys. 6. Krzywa rozrzutu błędów metrologicznych w zależności od stanu wodomierza dla strumienia Q_{min} oraz różnych producentów



Rys. 7. Krzywa rozrzutu błędów metrologicznych w zależności od stanu wodomierza dla strumienia Q_t oraz różnych producentów



Rys. 8. Krzywa rozrzutu błędów metrologicznych w zależności od stanu wodomierza dla strumienia Q_n oraz różnych producentów

Tab. 2. Statystyki opisowe wodomierza DN 15-20 w klasie B dla różnych producentów urządzeń

Producent	Średni błąd wskazań dla strumienia			Mediana			Stan m ³	Liczba przebadanych urządzeń
	Qn %	Qt %	Qmin %	Qn %	Qn %	Qn %		
A	-2,03	-0,79	-5,39	-	-	-	164	81
B	-4,40	-0,95	-8,40	-	-	-	252	149
C	-0,24	-2,01	-14,52	0,59	0,45	-3,55	621	158
D	-1,43	-2,04	-7,40	0,53	0,40	-1,00	644	492
E	-0,19	-1,64	-13,99	0,27	0,80	-5,00	675	134
F	-1,35	-1,77	-21,05	-0,86	-0,50	-8,00	900	436
G	-0,43	-1,12	-7,25	-0,08	0,00	-1,57	986	919
H	3,08	2,28	-10,07	1,43	1,40	-5,00	1058	801

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Wodomierze jednostrumieniowe klasy B stanowią w wielu przedsiębiorstwach wodociagowych podstawowe urządzenia pomiarowe. Za takim ich traktowaniem przemawia jednak jedynie cena tych urządzeń. Straty pozorne, które generują w stosunku do wodomierzy klasy C, można szacować na nawet 5% mierzonej objętości.

Jakość wody oraz konstrukcja tych urządzeń decydują w głównej mierze o ich trwałości metrologicznej, a więc o wzroście błędów wskazań powyżej MPE.

Najbardziej wrażliwym parametrem jest minimalny strumień objętości, dla którego stwierdzono, iż w całej przebadanej populacji 51% nie mieściła się w błędach pierwotnych, zaś 33% nie mieściła się w błędach granicznych dopuszczalnych w eksploatacji (średnie).

Jeśli po pięciu latach eksploatacji wodomierzy zażądano wykonania ich ekspertyzy, okazałoby się, iż 37% nie mogłaby pod względem metrologicznym być dalej stosowana – eksploatowana.

Nie ma w literaturze jednoznacznej odpowiedzi, który z parametrów: średnia czy mediana lepiej opisują błędy wodomierzy przy ocenie strat pozornych wody w sieci wodociagowej. Brak na tą chwilę jest modelu obrazującego kształtowanie się strat pozornych wody.

Literatura

- Czeszczewik D., Tuz P. (2009). Dobór i eksploatacja wodomierzy. *Rynek Instalacyjny*, 5/2009, 35-38.
- Dyrektywa Komisji 2009/137/WE z dnia 10 listopada 2009 r. zmieniająca dyrektywę 2004/22/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie przyrządów pomiarowych w zakresie wykorzystania błędów granicznych dopuszczalnych, w odniesieniu do załączników MI-001 do MI-005 dotyczących przyrządów
- Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 16 sierpnia 2010 roku o zmianie do rozporządzenia w sprawie zasadniczych wymagań dla przyrządów pomiarowych. Dz. U. nr 163 z 2010 r., poz. 1103.
- Speruda S. (2007). Kurs operatora sieci wodociagowej. Ograniczenia strat wody z wycieków. *Akademia Strat Wody. WATERKEY*, Warszawa 2007.

SINGLE YET WATER METERS IN B-CLASS (HORIZONTAL)

AFTER 5 YEAR EXPLOITATION IN WATER SYSTEMS

Abstract: Water meter in waterwork company is the basic measuring instrument for water consumption measuring, both pumped into the water network as well as at the final recipient. The largest group consists of devices within DN 15 and DN 20 sizes. More and more often, water companies decide to purchase and install water meters of a class C in the water supply network to reduce water losses. Selection of the type of the meter should be subjected to ex. quality of the water in the network. Single-Class B Meters have been the main water measuring device in many companies. The operation time period of water meters in the water network (legalization period) is in Poland five years. The paper presents a study on the metrological characteristics of single dry running meters of a Class B after 5 years of use in water distribution networks, in different water companies.