

MARIUSZ BIAŁY*

**ZASTOSOWANIE MODELU FC + MCC
W ANALIZIE NUMERYCZNEJ WSPÓŁPRACY CHŁODNI
KOMINOWEJ Z PODŁOŻEM GRUNTOWYM**

**APPLICATION OF FC + MCC MODEL
IN NUMERICAL ANALYSIS
OF COOLING TOWER WITH SUBSOIL**

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono lokalny model numeryczny współpracy chłodni kominowej o powłoce hiperboloidalnej z jednorodnym podłożem gruntowym. Do opisu gruntu w symulacjach numerycznych zastosowano komplementarny model gruntu FC+MCC i model Modified Cam-Clay. Celem artykułu było porównanie zachowania się i zbadanie efektywności obu tych praw konstytutywnych w analizach gruntów w stanach normalnej konsolidacji i silnej prekonsolidacji.

Słowa kluczowe: chłodnia kominowa, współdziałanie konstrukcji z podłożem

Abstract

The paper presents the local numerical model of interaction of hyperbolic cooling tower with subsoil. Soil in simulations was described by FC+MCC and Modified Cam-Clay models. The paper aimed at a comparison effectiveness behaviour of the two constitutive laws in analysis of soils in normal consolidation and overconsolidation states.

Keywords: cooling tower, soil-structure interaction

* Mgr inż. Mariusz Biały, Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska.

1. Wstęp

W praktyce projektowania fundamentów chłodni kominowych dominuje uproszczony schemat nieskończenie długiego fundamentu prostoliniowego na jednorodnym, sprężystym podłożu. Taki uproszczony opis ma wiele wad: nie uwzględnia współpracy konstrukcji z gruntem, krzywizny fundamentu i istotnego dla pracy konstrukcji punktowego oparcia podpór powłoki na fundamencie.

Analiza przestrzenna współpracy chłodni kominowej z podłożem gruntowym pozwala na symulację zachowania się rzeczywistych obiektów, uwzględniając przy tym:

- rzeczywistą geometrię konstrukcji pierścienia fundamentowego, powłoki i jej podpór ukośnych,
- punktowe obciążenie pierścienia fundamentowego od podpór powłoki,
- wpływ sztywności powłoki na pracę układu chłodnia–podłoże.

Warunkiem otrzymania wiarygodnych rozkładów i wartości naprężeń i osiadań gruntu pod fundamentem jest gęsta dyskretyzacja modelu geometrycznego podłoża, szczególnie pod fundamentem i w jego najbliższym otoczeniu. Wymaga to użycia bardzo dużej liczby elementów skończonych, co znacznie poszerza rozmiar zadania. Modelowanie całej konstrukcji chłodni przy tak gęstej dyskretyzacji generuje układ o bardzo dużej ilości stopni swobody, trudny do rozwiązania nawet dla zaawansowanych systemów obliczeniowych i komputerów o dużej zdolności obliczeniowej.

Geometria konstrukcji żelbetowej chłodni kominowej o powłoce hiperboloidalnej charakteryzuje się pewną symetrią i powtarzalnością; można wydzielić w niej segmenty obejmujące jedną parę słupów ukośnych, odcinek pierścienia fundamentowego i odpowiadający im fragment powłoki. Symetria pierścienia fundamentowego jest zaburzona jedynie w miejscach, gdzie zlokalizowane są kanał zasilający i odpływu wody. Podpory powłoki rozmieszczone są rytmicznie, parami, a współrzędne osi każdej z tych par wyznacza biegunowy układ współrzędnych o środku zlokalizowanym w centrum chłodni. Kąt środkowy między promieniami opisującymi dwie takie osie jest powtarzalny i stały, jedynym wyjątkiem są dwie pary słupów bramy wjazdowej do chłodni, gdzie kąt ten jest większy. Powłoka chłodni jest symetryczna. Taka powtarzalność pozwala rozważać reprezentatywny wycinek konstrukcji chłodni wraz z bryłą podłoża o odpowiedniej głębokości i dostatecznie gęstej dyskretyzacji, zawierający kilka kolejnych segmentów. Bazując na powyższych założeniach, zbudowano lokalny model geometryczny, złożony z trzech segmentów, zaprezentowany poniżej. Kalibrację geometrii tego modelu przeprowadzono w serii analiz numerycznych zadań, zbudowanych na bazie jednego, trzech i pięciu powtarzalnych segmentów. Sprawdzone również wpływ wysokości zamodelowanego fragmentu powłoki na rozkłady i wartości naprężeń i osiadań gruntu pod fundamentem.

Zbudowanie lokalnego modelu geometrycznego o gęstej dyskretyzacji podłoża jest pierwszym krokiem w kierunku uzyskania realistycznego opisu problemu współpracy chłodni z gruntem. Kolejnym krokiem decydującym o efektywności i dokładności działania modelu numerycznego jest dobór adekwatnego prawa konstytutywnego, realistycznie opisującego grunt. Zaproponowany w [8] komplementarny model FC+MCC odpowiada tym wymaganiom, uwzględniając plastyczność, stany prekonsolidacji i bardzo duże zmiany sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń.

2. Charakterystyka modelu FC+MCC

Model FC+MCC w wersji podanej w [8] bazuje na modelu Faheya–Cartera. Model Faheya–Cartera, będący uogólnieniem propozycji Duncana–Changa (1970), powstał jako proste prawo konstytutywne dobrze opisujące zachowanie się prekonsolidowanego gruntu w przedziale małych odkształceń, tj. duży spadek sztywności gruntu w przedziale wartości od 10^{-4} do $10^{-1}\%$. Jest to izotropowy model hiposprężysty. Jego sztywność reprezentowana jest więc przez styczny moduł ścinania G_t oraz sprzężony z nim przez stałą wartość współczynnika Poissona moduł K_t .

W oryginalnej pracy Faheya–Cartera (1993) styczny moduł ścinania wyrażony jest przez naprężenie styczne

$$G_s = G_o \left[1 - f \left(\frac{\tau}{\tau_{\max}} \right)^g \right] \quad (1)$$

a z definicji modułu stycznego otrzymujemy

$$G_t = G_o \frac{\left[1 - f \left(\frac{\tau}{\tau_{\max}} \right)^g \right]^2}{1 - f(1-g) \left(\frac{\tau}{\tau_{\max}} \right)^g} \quad (2)$$

Przechodząc do niezmienników naprężenia p' i q , można zapisać moduły w postaci

$$G_s = G_o \left[1 - f \left(\frac{q}{q_f} \right)^g \right] \quad (3)$$

$$G_t = G_o \frac{\left[1 - f \left(\frac{q}{q_f} \right)^g \right]^2}{1 - f(1-g) \left(\frac{q}{q_f} \right)^g} \quad (4)$$

gdzie początkowy moduł ścinania

$$G_o = G^* p_a \left(\frac{p'}{p_a} \right)^n \quad (5)$$

a wytrzymałość na ścinanie

$$q_f = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} p' + \frac{6 \cos \phi'}{3 - \sin \phi'} c' \quad (6)$$

$$K_t = \frac{2(1 + \nu_t) G_t}{3(1 - 2\nu_t)} \quad (7)$$

Przyrostowe równania konstytutywne modelu Faheya–Cartera mają ostatecznie postać

$$\delta \sigma = \mathbf{D}_t \delta \varepsilon \quad (8)$$

gdzie

$$\mathbf{D}_t = \begin{bmatrix} K_t + \frac{4}{3} G_t & K_t - \frac{2}{3} G_t & K_t - \frac{2}{3} G_t & 0 & 0 & 0 \\ & K_t + \frac{4}{3} G_t & K_t - \frac{2}{3} G_t & 0 & 0 & 0 \\ & & K_t + \frac{4}{3} G_t & 0 & 0 & 0 \\ & (sym) & & G_t & 0 & 0 \\ & & & & G_t & 0 \\ & & & & & G_t \end{bmatrix} \quad (9)$$

W komplementarnym modelu FC+MCC wprowadzono modyfikacje

$$\kappa_1 = \frac{(1 + e_o) p' \left[1 - f \left(1 - g \left(\frac{q}{q_f} \right) \right) \right]^g}{G_o \left[1 - f \left(\frac{q}{q_f} \right) \right]^g} \quad (10)$$

$$\kappa = \frac{3(1 - 2\nu_t) (1 + e_o) p'}{2(1 + \nu_t) G_t} \quad (11)$$

W zaproponowanym modelu FC+MCC po wejściu ścieżki naprężeń na powierzchnię plastyczną obowiązują znane równania modelu Modified Cam–Clay.

Parametry modelu gruntu FC+MCC: ν_0 , ϕ' , c' , G^* , n , f , g

3. Dane do analizy

Analizy numeryczne przeprowadzono dla chłodni kominowej posadowionej na jednorodnym podłożu gruntowym opisanym modelem FC+MCC. Do zbadania wrażliwości modelu numerycznego na zastosowane do opisu gruntu prawo konstytutywne wykonano także analizy, używając modelu Modified Cam-Clay. Jednorodne podłoże podzielono na poziome „warstwy”, wyznaczając w środku grubości każdej z nich wartość współczynnika prekonsolidacji OCR i ciśnienie prekonsolidacji p_{c0} . Taki podział przyjęto celowo, aby obserwować i kontrolować zmiany wartości tych parametrów ze zwiększającą się głębokością podłoża.

Wyróżnione warstwy to: grunt zasypowy wokół fundamentu o grubości 1,3 m, poduszka pod fundamentem o grubości 0,3 m, warstwa 1 o grubości 3,375 m, warstwa 2 o grubości 3,375 m, warstwa 3 o grubości 3,0 m, warstwa 4 o grubości 2,25 m, warstwa 5 o grubości 3,3 m i warstwa 6 o grubości 2,4 m. Parametry warstw gruntu przyjęte do analiz: dla podłoża opisanego modelem MCC

$\phi = 29^\circ$; $K_0 = 0,5152$; $\nu = 0,3$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$; $\lambda = 0,006554$; $\chi = 0,003414$; $M_c = 1,16$; $e_0 = 0,675$

dla podłoża opisanego modelem FC+MCC

$\phi = 29^\circ$; $K_0 = 0,5152$; $\nu = 0,3$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$; $\lambda = 0,006554$; $\chi = 0,003414$; $M_c = 1,16$; $e_0 = 0,675$; $k = 0,7212$; $c = 10$; $K^* = 6000$; $n = 0,8$; $p_a = 1$; $f = 0,9$; $g = 0,6$

Wartości ciśnienia prekonsolidacji p_{c0} i współczynnika prekonsolidacji OCR dla ww. warstw podano w tab. 1.

Tabela 1

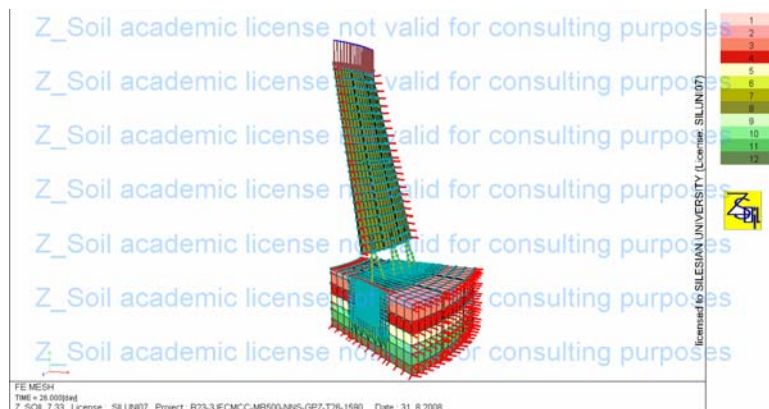
Zestawienie wartości p_{c0} i OCR dla warstw podłoża prekonsolidowanego pod obciążeniem 20 i 500 kPa

Opis warstwy	Obciążenie erozyjne			
	$q_0 = 20 \text{ kPa}$		$q_0 = 500 \text{ kPa}$	
	$p_{c0} \text{ (kPa)}$	OCR	$p_{c0} \text{ [kPa]}$	OCR
Grunt zasypowy wokół fundamentu o grubości 1,3 m	30,9	2,54	480	9,5
Poduszka pod fundamentem o grubości 0,3 m	45,8	1,69	494	18,24
Warstwa 1 o grubości 3,375 m	74,3	1,33	525	9,4
Warstwa 2 o grubości 3,375 m	138	1,16	583	4,9
Warstwa 3 o grubości 3,0 m	196	1,1	643	3,6
Warstwa 4 o grubości 2,25 m	246	1,08	694	3,05
Warstwa 5 o grubości 3,3 m	296	1,06	746	2,67
Warstwa 6 o grubości 2,4 m	351	1,056	799	2,4

Żelbetowa konstrukcja fundamentu pierścieniowego, podpór i powłoki chłodni traktowana jest jako izotropowy materiał liniowo-sprężysty. Całkowita wysokość chłodni mierzona od poziomu terenu wynosi 133,2 m. Promień fundamentu pierścieniowego ma długość 47,2 m. Wysokość fundamentu równa jest 1,3 m, a jego szerokość 4,5 m.

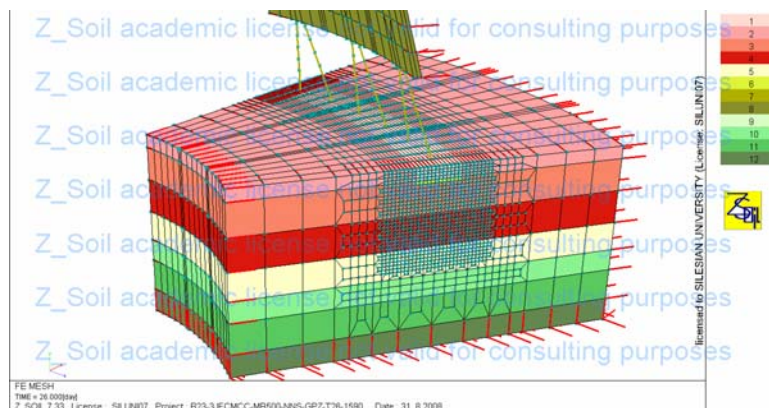
4. Analiza numeryczna

W analizach numerycznych posłużono się modelem 3-segmentowym (rys. 1 i 2), zbudowanym na bazie 6- i 8-węzłowych przestrzennych elementów skończonych. Na styku fundament–podłoże wygenerowano powierzchniowe elementy kontaktowe.



Rys. 1. Model MES układu fundament–podłoże

Fig. 1. Foundation–subsoil MES model



Rys. 2. Model MES – dyskretyzacja podłoża

Fig. 2. FEM model – discretisation of subsoil

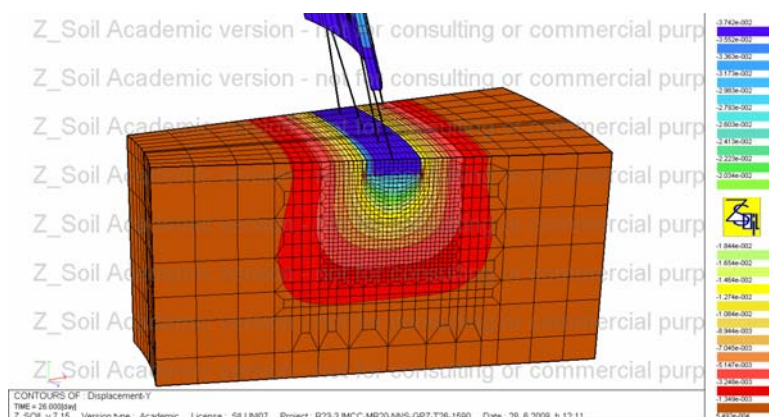
Parametry warstwy kontaktowej: $\phi = 20^\circ$, $c = 2$ kPa.

Beton fundamentu, podpór i powłoki: $E = 30\,000\,000$ kN/m²; $\nu = 0,2$; $\gamma = 25$ kN/m³.

Powłoka chłodni została zamodelowana do poziomu 41% całkowitej wysokości konstrukcji chłodni. Ciężar pozostałej części powłoki zastąpiono przyłożonym do górnej części zamodelowanego fragmentu obciążeniem równomiernie rozłożonym.

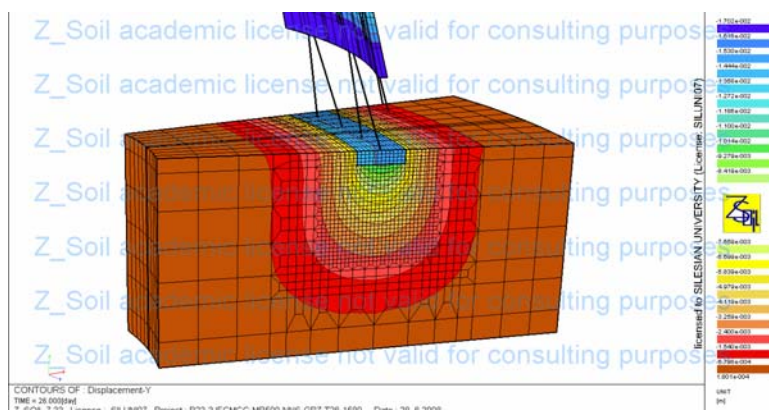
5. Wyniki analizy numerycznej

W analizach badano wartości osiadań i naprężeń podłoża pod fundamentem w węzłach i elementach obserwowanych na płaszczyźnie sieciowej, prostopadłej do płaszczyzny podstawy modelu. Płaszczyzna ta przechodzi przez punkt oparcia słupa chłodni na pierścieniu fundamentowym.



Rys. 3. Izolinie przemieszczeń pionowych UY dla modelu MCC, OCR = 1,69

Fig. 3. Isoline of vertical settlements UY for MCC model, OCR = 1,69

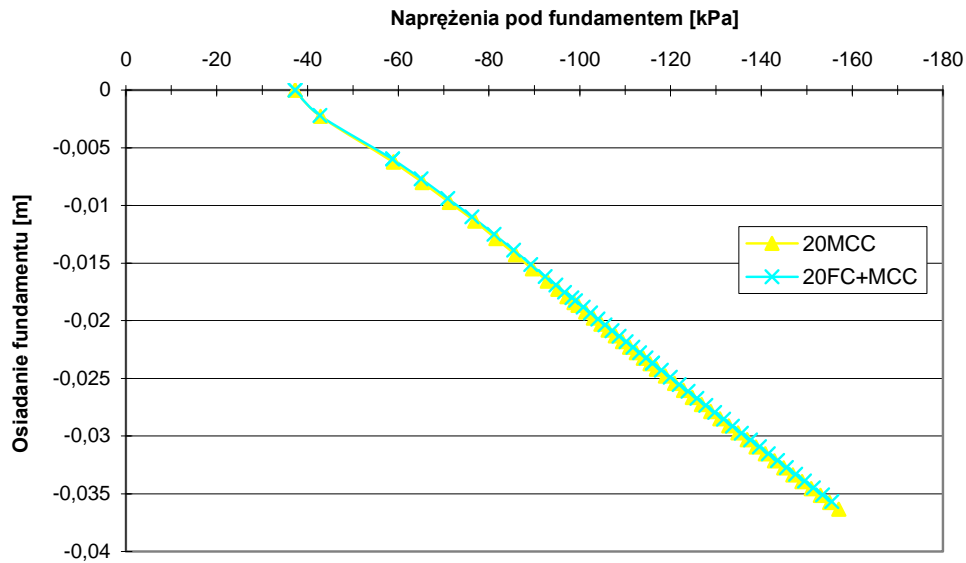


Rys. 4. Izolinie przemieszczeń pionowych UY dla modelu FC+MCC, OCR = 18,24

Fig. 4. Isoline of vertical settlements UY for FC+MCC model, OCR = 18,24

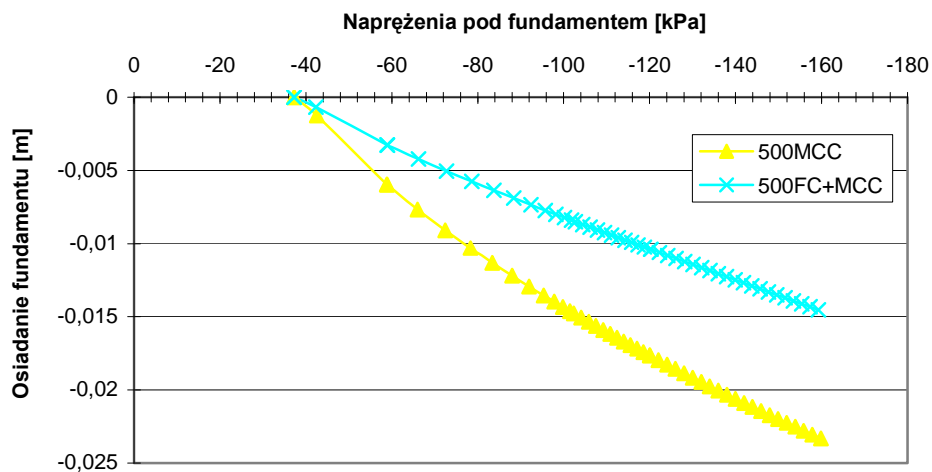
Izolinie przemieszczeń pionowych UY podłoża chłodni dla dwóch wartości współczynnika prekonsolidacji gruntu $OCR+1,69$ i $OCR+18,24$ pokazano na rys. 3 i 4.

Wyniki symulacji numerycznej w postaci charakterystyk naprężenie pod fundamentem–osiadanie fundamentu pokazano na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Porównanie charakterystyk naprężenia–osiadania podłoża normalnie skonsolidowanego

Fig. 5. Comparison of settlement–stresses characteristics for normal consolidated subsoil



Rys. 6. Porównanie charakterystyk naprężenia–osiadania podłoża prekonsolidowanego

Fig. 6. Comparison of settlement–stresses characteristics for overconsolidated subsoil

6. Wnioski

Zaprezentowany przestrzenny model numeryczny chłodni kominowej na podłożu gruntowym wiernie obrazuje charakter współpracy konstrukcji z gruntem, uwzględniając punktowe obciążenie fundamentu pierścieniowego, wpływ sztywności układu powłoka–słupy ukośne–pierścieni na rozkład naprężeń w gruncie pod fundamentem budowli oraz wielkość jego osiadań.

Po analizie zaprezentowanego w artykule modelu oraz wyników testów numerycznych można stwierdzić, że przyjęty model materiałowy FC+MCC w wyżej zaprezentowanym ujęciu może efektywnie uwzględniać plastyczność, stopień prekonsolidacji i bardzo duże zmiany sztywności gruntów prekonsolidowanych w zakresie małych odkształceń dla wybranego układu fundament–podłoże.

Zgodny przebieg charakterystyk osiadania–naprężenia dla modeli MCC i FC+MCC w przypadku podłoża normalnie skonsolidowanego jest potwierdzeniem prawidłowego działania drugiego z tych praw konstytutywnych zarówno w stanach normalnej, jak i silnej prekonsolidacji i wynika z założeń przyjętych przez autorów tego modelu [zob. 8].

Literatura

- [1] Atkinson J.H., Bransby P.L., *The mechanics of soils. An introduction to critical state soil mechanics*, McGraw-Hill Book Company, London 1978.
- [2] Biały M., *Analiza numeryczna układu fundament pierścieniowy–podłoże sprężysto–plastyczne pod obciążeniem ciągłym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 102, Gliwice 2004, 107-114.
- [3] Biały M., *Modelowanie współdziałania chłodni kominowej z podłożem gruntowym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 1756, Gliwice 2007, 91-99.
- [4] Fahey M., Carter J.P., *A finite element study of the pressuremeter in sand using a nonlinear elastic plastic model*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 30, 1993, 348-362.
- [5] Gryczmański M., *Wprowadzenie do opisu sprężysto–plastycznych modeli gruntów*, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa 1995.
- [6] Gryczmański M., *Analiza statyczna dowolnie uwarstwionego podłoża budowli metodą elementów skończonych*, rozprawa doktorska, Gliwice 1973.
- [7] Gryczmański M., *Podstawy teoretyczne w geotechnice*, XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania nt. „Geotechnika w Budownictwie i Transporcie”, Gdańsk 1997.
- [8] Gryczmański S.M., Uliniarz R., *A simple critical state model with small strain nonlinearity overconsolidation soils*, Foundations of civil and environmental engineering, Poznań 2008.
- [9] Gryczmański M., *Współpraca budowli z podłożem gruntowym*, I Problemowa Konferencja Geotechniki nt. „Współpraca budowli z podłożem”, II B Politechniki Białostockiej, Sekcja Geotechniki PAN i PKG, Wigry 1998.
- [10] Ledwoń J., Golczyk M., *Chłodnie kominowe i wentylatorowe*, Arkady, Warszawa 1967.