

Wymiarowanie konstrukcji wieżowych

Podstawy aktualnych norm dla kominów przemysłowych

Prof. dr hab. inż. Piotr Noakowski, Dipl.-Ing. Andreas Harling, Dipl.-Ing. Markus Rost, University Dortmund, Exponent Industrial Structures, Düsseldorf

1. Podstawy opracowania

Wprowadzenie

Po rozpoznaniu nieprawidłowości w wymiarowaniu konstrukcji kominów, CICIND (Międzynarodowa Organizacja ds. Kominów) postanowiła wydać własny modelowy kodeks [02] w celu umożliwienia spójnego, bezpiecznego i ekonomicznego projektowania kominów. Między innymi, wytyczne tego kodeksu powinny pomóc w rozwiązywaniu następujących zagadnień, które od wielu lat są kwestiami problematycznymi w branży kominowej:

- Kwestie wytrzymałościowe w wymiarowaniu lokalnym oraz kwestie dotyczące ugięć w wymiarowaniu globalnym,
- Znaczenie momentów drugiego rzędu i ich określanie w sposób jak najbardziej odzwierciedlający rzeczywistość,
- Nakładanie się (superpozycja) momentów wywołanych przez temperaturę oraz momentów wywołanych działaniem wiatru,
- Zapobieganie utracie odporności (nośności) na wiatr spowodowanej szerokimi pęknięciami pionowymi,
- Zwiększenie trwałości poprzez skuteczne ograniczenie szerokości pęknięć (rys).

Ponieważ projektowanie konstrukcji wieżowych jest jednym z obszarów specjalizacji autora, kilka z cytowanych metod projektowania powstało podczas jego pracy zawodowej. Te, które stały się popularne i stały się częścią odpowiednich norm, zostały przedstawione w niniejszym opracowaniu. Niemniej jednak, autor prosi o zrozumienie dla faktu, że poszczególne opisy są w większości krótkie. W razie potrzeby, porównać je można z właściwymi dokumentami i normami.

Metody projektowania

Odpowiednie prace badawcze zaowocowały opracowaniem różnych metod projektowania [01, 07 do 13], powszechnie akceptowanych w normach [02, 03, 04, 27], badaniach [05, 06, 14, 15, 24, 28] i praktyce projektowej [16 do 22, 25, 26]. Te metody projektowania opisane w niniejszym opracowaniu, stosuje się do przewidywania następujących aspektów zachowania konstrukcji:

Nośność pionowa

Ugięcia całej konstrukcji wieżowej w celu określenia momentów drugiego rzędu.
Odształcenia w poszczególnych przekrojach poziomych, aby zapobiec zawaleniu się struktury.

Nośność pozioma

Naprężenia stali w przekrojach pionowych, aby zapobiec uginaniu i powstawaniu pęknięć.
Szerokości pionowych pęknięć, aby zapewnić właściwą wytrzymałość powłok malarskich i pierścieni wzmacniających.

Nowe normy

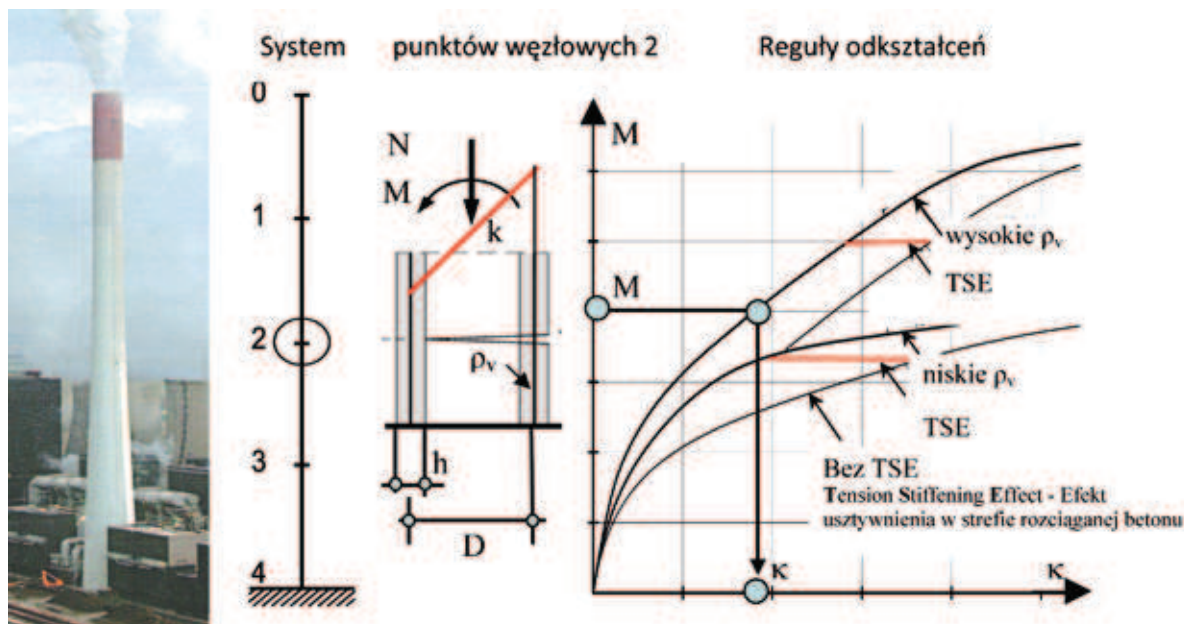
Powyższe metody projektowania zostały opracowane podczas pracy zawodowej autorów wykonujących zadania inżynierów budownictwa. Duża liczba zrealizowanych projektów, liczne dyskusje i metody kontrolne poszczególnych narzędzi projektowych stały się popularne w branży budowlanej. W oparciu o nie, ww. metody zostały przyjęte jako zasady w następujących normach właściwych:

- CICIND Model Code for Concrete Chimneys, Part A: The Shell, October 1984 [02] (*Kodeks Modelowy Kominów Betonowych, Część A: Płaszcz, październik 1984*),
- DIN 1056 Commentary: on Industrial Chimneys, by Nieser & Engel, 1986 [07] (*Komentarz dotyczący Kominów Przemysłowych*),
- CICIND Model Code for Concrete Chimneys, Part A: The Shell, August 2001 [02] (*Kodeks Modelowy Kominów Betonowych, Część A: Płaszcz, sierpień 2001*),
- DIN EN 13084-2: Free-standing Chimneys, Part 2: Concrete Chimneys, January 2006 [04] (*Wolnostojące kominy przemysłowe, Część 2 Kminy betonowe, styczeń 2006*),
- DIN V 1056: Free-standing Stacks, Calculation and Design, Draft March 2006 [03] (*Kminy Wolnostojące, Obliczenia i projektowanie, projekt marzec 2006*),
- PNB EN 13084-2: Wolno stojące kominy przemysłowe, Część 2 Kminy betonowe [27].

2. Nośność pionowa

Proces projektowania. Rys. 1, [10, 13, 21]

Proces projektowania nośności pionowej polega na ograniczaniu naprężeń w betonie (ϵ_c) wywołanych ob-



Rys. 1. Nośność pionowa. Modelowanie struktury i reguły odkształceń $M - k$

ciążeniem wiatrem oraz ciężarem własnym. Osiąga się to przez właściwe zaprojektowanie średnicy płaszcza komina (D), grubości ściany (h) oraz właściwej proporcji w zastosowaniu zbrojenia pionowego (ρ_v). Taki proces projektowania składa się z 5 kroków:

- (0) Modelowanie struktury poprzez oznaczenie punktów węzłowych w miejscach charakterystycznych,
- (1) Określenie D , h , ρ_v oraz odpowiednich reguł odkształceniowych $M - \kappa$ wraz z efektem usztywnienia (TSE) w strefie rozciąganej betonu dla wszystkich punktów węzłowych,
- (2) Obliczenie normalnych sił wynikających z wagi własnej i momentów zginających wywołanych wiatrem M ,
- (3) Określenie ugięcia i momentów drugiego rzędu, ΔM do zbieżności momentów,
- (4) Obliczenie naprężeń ϵ poprzez zrównoważenie wewnętrznych i zewnętrznych sił w celu określenia wytrzymałości,
- (5) Powtórzenie kroków (1) do (4) w przypadku niewłaściwych (zbyt wysokich lub zbyt niskich) naprężeń betonu.

Modelowanie struktury. Rys. 1, [10, 13, 21]

Modelowanie struktury obejmuje następujące działania:

- Tworzenie systemu obliczeń liczbowych z wykorzystaniem punktów węzłowych, które opisują standardowe zachowanie deformacji związanych z pęknięciami za pomocą reguł na odkształcenie.
- Określenie reguł odkształceń nieliniowych, które przedstawiają następujące stany struktury:
 - Podstawowa wysoka sztywność „dziewiczego”, niepękniętego węzła,
 - Pierwsze pęknięcia charakteryzujące się pojedynczymi rysami, zlokalizowanymi daleko od siebie,
 - Końcowe pęknięcia powstałe z wielu rys/pęknięć z nakładaniem się przylegających do siebie obszarów przejściowych,
 - Uginanie się zbrojenia w miejscu pęknięć.

Momenty drugiego rzędu. Rys. 2, [02, 08, 10, 13, 21] Momenty drugiego rzędu określane są przez podwójne połączenie krzywizn uzyskanych z reguł odkształceniowych:

- Momenty wywołane działaniem wiatru M i bieżące momenty drugiego rzędu w poszczególnych węzłach,
- Krzywizny $k(M+\Delta M)$ uzyskane z odpowiednich reguł odkształceniowych,
- Obroty $\varphi = \sum k$ będące numerycznym scaleniem krzywizn,
- Ugięcia $\delta = \sum \varphi = \sum \sum k$ będące numerycznym odzwierciedleniem zsumowania obrotów,
- Momenty drugiego rzędu ΔM z ugięciem,
- Sprawdzenie ΔM pod kątem zbieżności (konwergencji) z ΔM z poprzedniego kroku integracji.

Dzięki zastosowaniu tej zbliżonej do rzeczywistości procedury numerycznej opracowano następujące uproszczenie dla Kodeksu Modelowego CICIND w celu umożliwienia szybkiego praktycznego użycia:

$$\Delta M(z) = (1 + 2,3 \cdot z/H)(1 - z/H)^{2,3} (75 - 0,12 \cdot H)(1 + \rho/6) \cdot H^2 / 100 \cdot (M_w(0) \cdot N_D(0) / E_{IC}(0)) \quad (1)$$

$M_w(0)$ – momenty wywołane działaniem wiatru u podstawy wieży [MNm]

$\Delta M(z)$ – moment drugiego rzędu na wybranej wysokości [MNm]

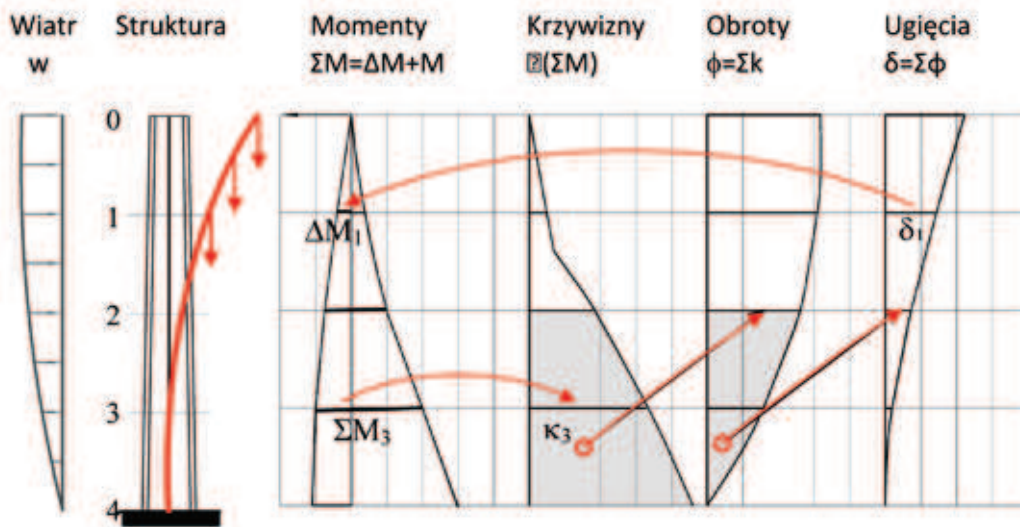
$N_D(0)$ – normalna siła u podstawy wieży [MN]

H – wysokość struktury wieżowej [m]

E – moduł elastyczności betonu [MNm²]

$I(0)$ – moment bezwładności u dołu wieży [m⁴]

ρ – proporcja zbrojenia [%]



Rys. 2. Nośność pionowa. Określanie momentów drugiego rzędu ΔM

Przykład projektowy. Rys. 3

Powyższe metody zostały wykorzystane do zaprojektowania osłony wiatrowej dużego komina. Ponieważ zastosowano najwyższe naprężenia, wymiarowanie tej struktury jest bezpieczne i ekonomiczne:

	dół	górze
Średnica D	20,00 m	10,00 m
Grubość ściany h	0,77 m	0,30 m
Zbrojenie pionowe ρ_v	0,50%	0,35 %
Naprężenie betonu ϵ_c	1,90‰	<2.00‰
Ugięcie δ	6,31 m	

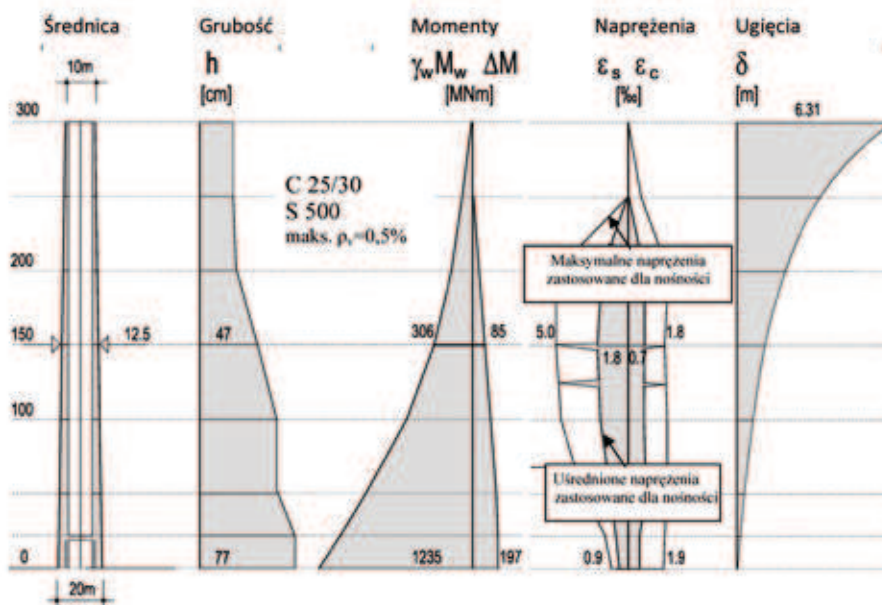
3. Nośność pozioma

Proces projektowania. [09, 10, 13, 21]

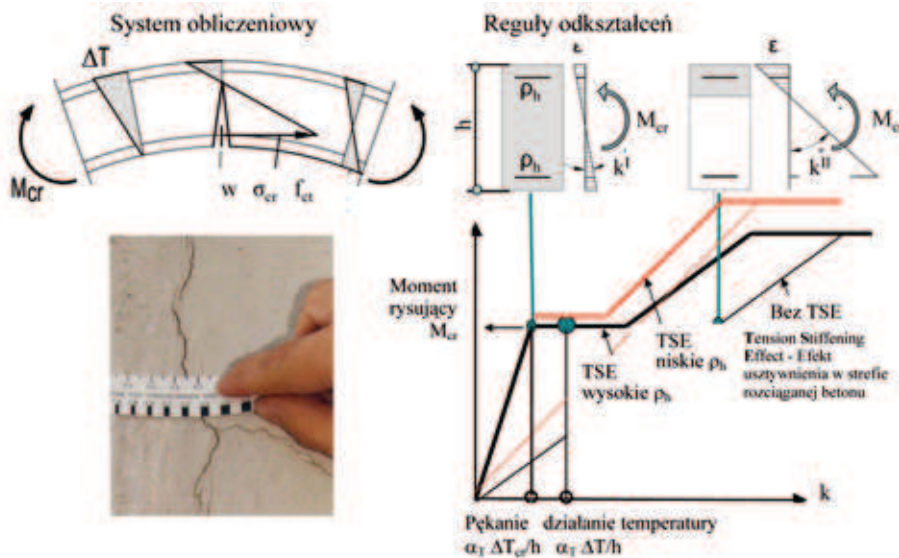
Proces projektowania nośności poziomej polega na ograniczaniu naprężeń w stali σ_s i szerokości pęknięć w_k wy-

wołanych działaniem wiatru. Osiąga się to przez właściwe zaprojektowanie zbrojenia obwodowego ρ_n oraz średnicy prętów zbrojeniowych d_s . Taki proces projektowania składa się z 5 kroków:

- (0) Modelowanie odpowiedniego przekroju za pomocą pierścieni zamkniętych,
- (1) Określenie wartości ρ_v , d_s oraz odpowiednich reguł odkształceniowych $M - k$ wraz z efektem usztywnienia (TSE) w strefie rozciąganej betonu,
- (2) Określenie momentu pęknięcia M_{cr} z wytrzymałości na rozciąganie betonu,
- (3) Obliczenie naprężeń stali σ_s z momentu rysującego,
- (4) Obliczenie szerokości pęknięć w_k z momentu rysującego,
- (5) Powtórzenie kroków (1) do (4) w przypadku potrzeby lepszego obliczenia naprężeń stali lub szerokości pęknięć.



Rys. 3. Nośność pionowa. Naprężenia i nachylenia komina o wysokości 300 m



Rys. 4.
Nośność pozioma.
Modelowanie struktury
i reguły odkształceń
 $M - k$

Modelowanie struktury. Rys. 4, [09, 10, 13, 21]
Modelowanie struktury obejmuje następujące działania:

- Tworzenie systemu obliczeń liczbowych, które opisują zachowanie pierścieni,
- Określenie reguł odkształceń wielokątnych, które przedstawiają stany struktury,
- Podstawowa wysoka sztywność niepękniętego węzła (część silnie wznosząca się),
- Pierwsze pęknięcia charakteryzujące się pojedynczymi rysami zlokalizowanymi daleko od siebie (część pozioma),
- Końcowe pęknięcia powstałe z wielu rys/pęknięć z nakładaniem się przylegających do siebie obszarów przejściowych (część wznosząca się),
- Uginanie się zbrojenia w miejscu pęknięć (część pozioma).

Dzięki tym regułom odkształceń wielokątnych obowiązują następujące zasady dotyczące zachowania przekrojów kominowych pod wpływem temperatury: Moment rysujący M_{cr} określony przez wytrzymałość na rozciąganie betonu f_{ct} jest wartością projektową wskutek swojej lokalizacji sklepieniowej w regule odkształcenia $M - k$:

$$M_{cr} \approx f_{ct} \cdot h^2 / 6 \quad (2)$$

Temperatura pęknięcia ΔT_{cr} jest niezależna od jakości betonu f_c dzięki współczynnikowi podziału f_c/E_c

$$k_T = k_M \Rightarrow \alpha_T \cdot \Delta T_{cr} / h = 2 \cdot f_{ct} / (E_c \cdot h) \\ \Rightarrow \Delta T_{cr} = 2 \cdot f_{ct} / (\alpha_T \cdot E_c) \quad (3)$$

Naprężenie stali σ_{cr} po spēkaniu zależy od wytrzymałości na rozciąganie betonu f_{ct} i od współczynnika ρ nazywanego minimalną proporcją zbrojenia

$$M^I = M^{II} \Rightarrow f_{ct} \cdot h^2 / 6 \approx \sigma_{cr} \cdot A_S \cdot 0,8 \cdot h \\ \Rightarrow \sigma_{cr} = 0,2 \cdot f_{ct} / \rho \quad (4)$$

Szerokość pęknięć. Rys. 5, [09, 10]

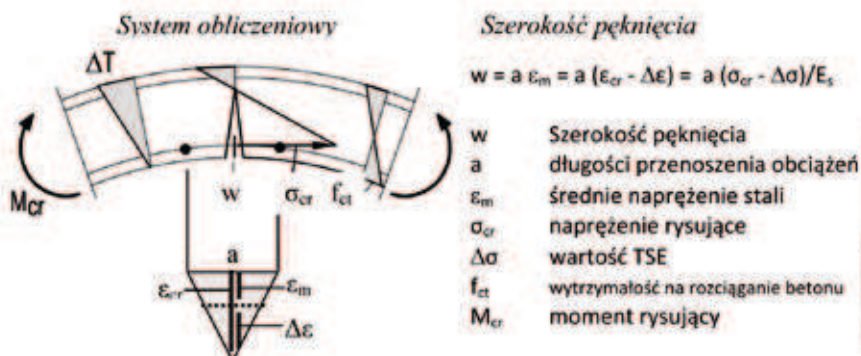
Szerokość pęknięcia jest wynikiem przesunięcia się stali na całej długości przenoszenia obciążeń i jest zgodna z następującą zależnością:

$$w = a \cdot \epsilon_m = a \cdot (\epsilon_{cr} - \Delta \epsilon) = a \cdot (\sigma_{cr} - \Delta \sigma) / E \quad (5)$$

w – szerokość pęknięcia

a – długość przenoszenia obciążeń wywołująca naprężenia stali w betonie przy przesuwaniu się stali napierającej na beton

ϵ_{cr} – wartość szczytowa naprężenia w samym pęknięciu



Rys. 5.
Nośność pozioma.
Określanie szerokości
pęknięć w

ε_m – średnie naprężenie wyrażone jako różnica między ε_{cr} a efektem usztywnienia w strefie rozciąganej betonu (TSE) $\Delta\sigma$

Przy zastosowaniu tej metody projektowania, następujące równanie zostało opracowane do stosowania w praktyce:

$$w_k = 3,5 \cdot (\sigma_{sr}^{0.88} \cdot d_s / f_{cm}^{0.66})^{0.89} \cdot (\sigma_s - 0,4 \cdot \sigma_{sr}) / E_s \quad (6)$$

- σ_{sr} – naprężenie rysujące [MN/m²]
- σ_s – oddziałujące naprężenie stali [MN/m²]
- E_s – współczynnik elastyczności stali [MN/m²]
- d_s – średnica pręta [mm]
- f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu [MN/m²]

Przykład projektowy. Rys. 6 i 7, [02, 07, 09, 10]

Powyższe metody zostały wykorzystane do zaprojektowania osłony wiatrowej dużego kominu. Ponieważ zastosowano wartości dopuszczalne, wymiarowanie tej struktury jest bezpieczne i ekonomiczne:

- Grubość ściany $h = 0,30$ m
- Zbrojenie pierścieniowe $\rho_h = 0,20\%$
- Średnica pręta $d_s = 12$ mm
- Naprężenia stali $\sigma_s = 270$ MN/m² < 300 MN/m²
- Szerokość pęknięcia $w = 0,23$ mm < 0,30 mm
- Odstęp między prętami $s = 17,5$ cm < 30,0 cm

Ten sam wynik daje wykres projektowy opracowany dla CICIND do szybkiego użycia w praktyce.

4. Wnioski

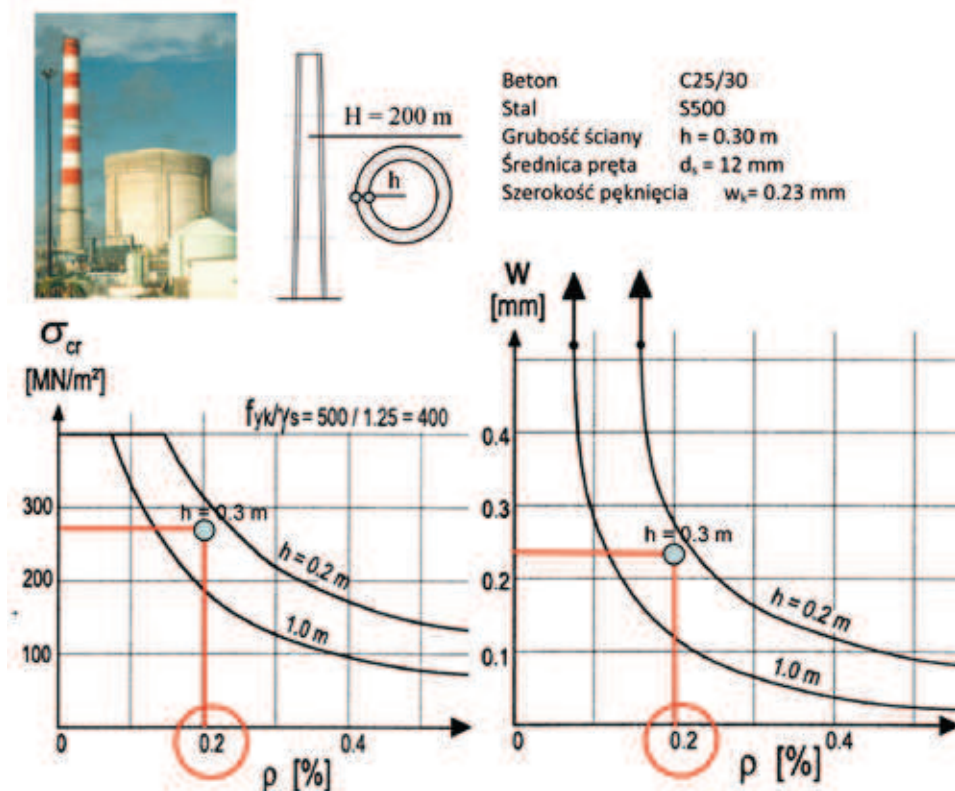
Metody projektowania przedstawione w niniejszym dokumencie zostały opracowane, aby spełnić dwa podstawowe wymogi: bezpieczeństwa i ekonomiczności konstrukcji wieżowych. Te dwa warunki zostały spełnione poprzez zbliżone do rzeczywistości modelowanie zachowania struktur. Ponieważ branża zaaprobowała takie rozwiązania, to przedstawione metody stały się fragmentami właściwych norm dla kominów przemysłowych. Są one opisywane przy użyciu następujących terminów:

- Nośność pionowa osłon wiatrowych,
- Proces projektowania,
- Modelowanie struktur,
- Przykład projektowy,
- Nośność pozioma osłon wiatrowych,
- Szerokość pęknięcia,

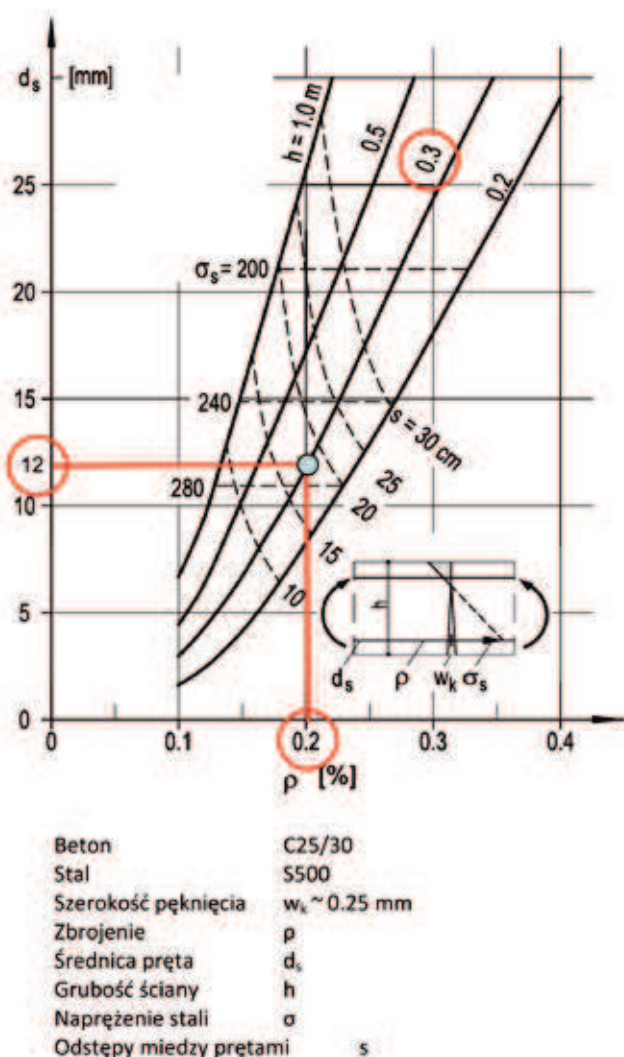
Jeżeli znajdzie taka potrzeba, podstawy i wydajność prezentowanych narzędzi projektowych można poznać dokładniej przy użyciu dokumentów wskazanych w bibliografii.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bottenbruch H., Noakowski P., Failure Probability of Tower Like Structures Bauingenieur 62 (1987), H. 1, S. 29–40, w jęz. niemieckim
- [2] CICIND: Model Code and Commentaries for Concrete Chimneys Part A: The Shell, Editions 1984 i 2001
- [3] DIN V 1056, Freistehende Schornsteine in Massivbauart, Berechnung und Ausführung. Deutsches Institut für Normung e. V., Ersatz für DIN 1056, Entwurf März 2005



Rys. 6.
Nośność pozioma.
Naprężenia stali i szerokość pęknięć na wysokości 200 m



Rys. 7. Nośność pozioma. Ograniczanie szerokości pęknięć w_k

- [4] DIN EN 13084: Freistehende Schornsteine, Teil 2: Betonschornsteine. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN e.V., kwiecień 2002
- [5] Kupfer H., Noakowski P., Untersuchung der Temperaturreisse in Industrieschornsteinen 3. Internationalen Schornsteintagung 1978, Essen 1979
- [6] Moncarz P., Coetzee B., Noakowski P., Circular Reinforced Concrete Shaft. CICIND Report (1998), Vol. 15
- [7] Nieser H., Engel V., Industrieschornsteine in Massivbauart. Kommentar zu DIN 1056, 1986
- [8] Noakowski P., Simplified determination of the 2nd order moments

- in chimneys 4th International Symposium on Industrial Chimneys (1981), The Hague, Netherlands
- [9] Noakowski P., Continuous theory for the determination of crack width Beton- und Stahlbetonbau, 1985
- [10] Noakowski P., Methods for Anchorage, Deformation, Constraint and Crack Width Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau (1988), H. 394 in German
- [11] Noakowski P., Gerstle K., Tower Structures Subjected to Temperature and Wind. Structural Journal of the American Concrete Institute (1990)
- [12] Noakowski P., Moncarz P., Stiffness oriented design of reinforced concrete structures. Księga jubileuszowa Prof. Tadeusza Godyckiego/Ćwirko, Politechnika Gdańska, 1998
- [13] Noakowski P., Schäfer H.G., Steifigkeitsorientierte Statik im Stahlbetonbau. Ernst & Sohn, 2003
- [14] Noakowski P., Breddermann M., Harling A., Pohl B., Cracks in concrete Masts. 4rd International Conference AMCM, Kraków, 2002
- [15] Noakowski P., Wytrzymałość betonu na rozciąganie i jego przyczepność do stali. Konferencja Dni Betonu, Polski Cement, Szczrzyk, 2002
- [16] Noakowski P., Breddermann M., Harling A., Wzmacnianie konstrukcji wieżowych. XXI Konferencja Awarie Budowlane, Międzyzdroje, maj 2003
- [17] Noakowski P., Budownictwo przemysłowe w różnych krajach świata IV Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo w Energetyce, Turów, maj 2004
- [18] Noakowski P., Zabytkowe kominy fabryczne VI Konferencja Naukowo-Techniczna REW-INŻ, Kraków, listopad 2004
- [19] Noakowski P., Ocena stanu budowli przemysłowych. Księga konferencyjna jubileuszu Wydziału Inżynierii Łądowej PW, grudzień 2005
- [20] Noakowski P., Ocena stanu technicznego wybranych budowli przemysłowych V Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo w Energetyce, maj 2006
- [21] Noakowski P., Breddermann M., Harling A., Rost M., Turmartige Industriebauwerke, Grundlagen der CICIND, DIN EN 13084, Betonkalender 2006, Ernst und Sohn
- [22] Noakowski P., Wzmacnianie konstrukcji wieżowych. Konferencja Naukowa: Trwałość i skuteczność napraw obiektów budowlanych, Poznań, 2006
- [23] Noakowski P., Limitation of crack width. CICIND Chimney Book 2006
- [24] Noakowski P., Close to reality methods for the structural design of towers. Architecture, Civil Eng., Environment, The Silesian Univ. of Technology, Vol. 3/2010
- [25] Noakowski P., Breddermann M., Elektrownie wiatrowe 54 Konferencja Naukowa KILW PAN i KN PZITB, Krynica, wrzesień 2008
- [26] Noakowski P., Harling A., Breddermann M., Rost M., Windkraftanlagen... Die Bautechnik, wrzesień 2009, Ernst und Sohn
- [27] PNB EN 13084-2: Wolno stojące kominy przemysłowe, Część 2 Kominy betonowe, Polski Komitet Normalizacyjny, styczeń 2006
- [28] VGB PowerTech: Industrieschornsteine, Hinweise zur Bauausführung und Betrieb Merkblatt, VGB-M 642 U, Essen 2003

Prenumerata 214,20 zł
ulgowo tylko 107,10 zł

www.przegladbudowlany.pl