

Projektowanie żelbetowych kominów przemysłowych wieloprzewodowych

Marta Słowik¹, Małgorzata Dobrowolska², Krzysztof Borzęcki²

¹ Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej, Politechnika Lubelska, Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: m.slowik@pollub.pl

² Absolwenci, Katedra Konstrukcji Budowlanych

Streszczenie: W artykule opisano zagadnienia związane z projektowaniem żelbetowych kominów przemysłowych wieloprzewodowych o złożonych kształcie przekroju, które nie są ujęte w przepisach normowych. Dokonano również przeglądu różnych koncepcji kształtowania przekroju kominów wieloprzewodowych, ze szczególnym uwzględnieniem kominów trzy i czteroprzewodowych. Artykuł jest wzbogacony o przykłady żelbetowych kominów tego typu zrealizowanych w Polsce.

Słowa kluczowe: konstrukcje żelbetowe, kominy przemysłowe wieloprzewodowe.

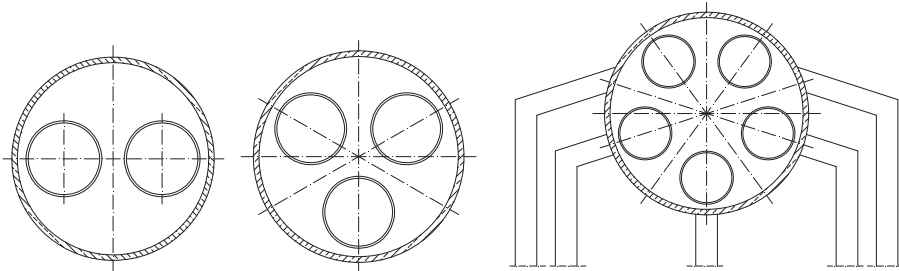
1. Wprowadzenie

Zasady projektowania kominów żelbetowych, które określa norma PN-88/B-03004 „Kominy murowe i żelbetowe. Obliczenia statyczne i projektowanie” z 1988 roku [1], dotyczą obiektów o konstrukcji trzonu w postaci kołowej powłoki cylindrycznej bądź stożkowej (tzw. kominy zbieżne) o stałej lub skokowo zmiennej grubości na wysokości komina. Taka konstrukcja trzonu jest stosowana głównie w kominach jednoprzewodowych, które są najczęściej wznoszonymi kominami przemysłowymi w praktyce. Żelbetowe kominy wieloprzewodowe mają zazwyczaj bardziej złożoną konstrukcję. Przy projektowaniu i realizacji tego typu obiektów pojawia się szereg problemów naukowo – technicznych, konstrukcyjnych i wykonawczych, które nie zostały jeszcze w pełni rozwiązane. Wobec braku wytycznych normowych w zakresie projektowania przemysłowych kominów wieloprzewodowych o złożonym kształcie przekroju, dokumentacja projektowa tego typu obiektów zrealizowanych do tej pory była opracowywana w każdym przypadku indywidualnie. Prowadzone badania, dotyczące rozwiązania pewnych aspektów związanych ze specyfiką projektowania kominów wieloprzewodowych, dotyczą głównie zasad wyznaczania rozkładu naprężeń w mimośrodowo ściskanych przekrojach o złożonych kształcie (np. prace Lechmana [2, 3]) czy określania współczynnika oporu aerodynamicznego (np. prace Żurańskiego [4, 5]).

2. Kształtowanie kominów wieloprzewodowych

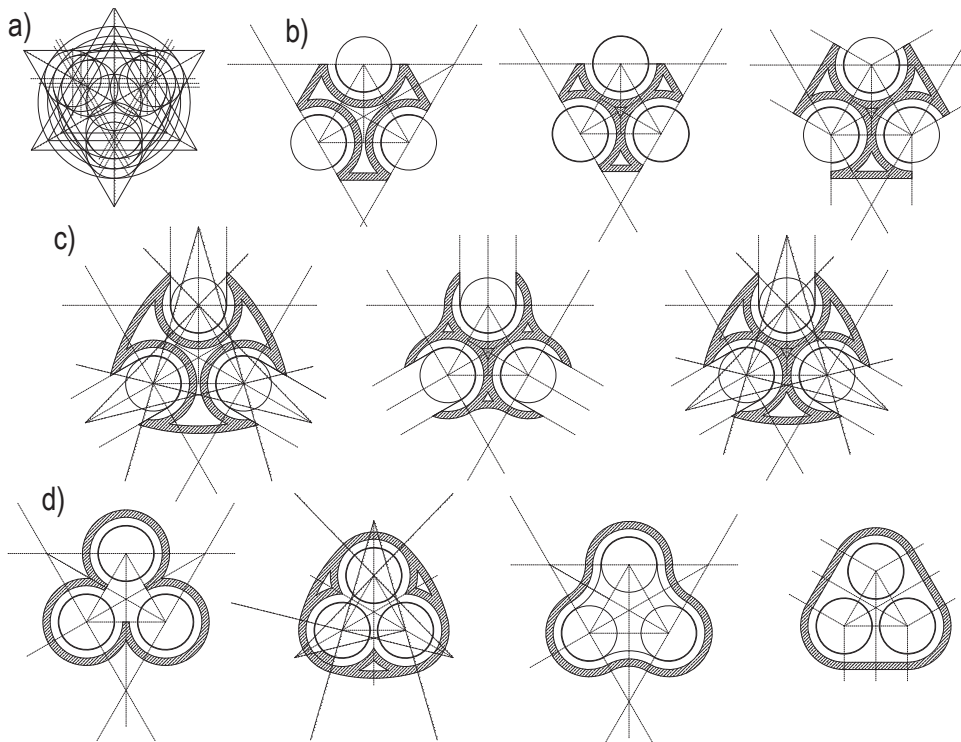
Kominy wieloprzewodowa są wysokościowymi obiektami budowlanymi o skomplikowanej konstrukcji i wyposażeniu, w skład którego wchodzi między innymi stopy, drabinki, dźwig towarowy, aparatura kontrolna, instalacje elek-

tryczne oświetlenia, zasilania i sygnalizacji. Początkowo konstrukcji nośnej komina wieloprzewodowego nadawano kształt obrotowej powłoki cylindrycznej (Rys. 1).



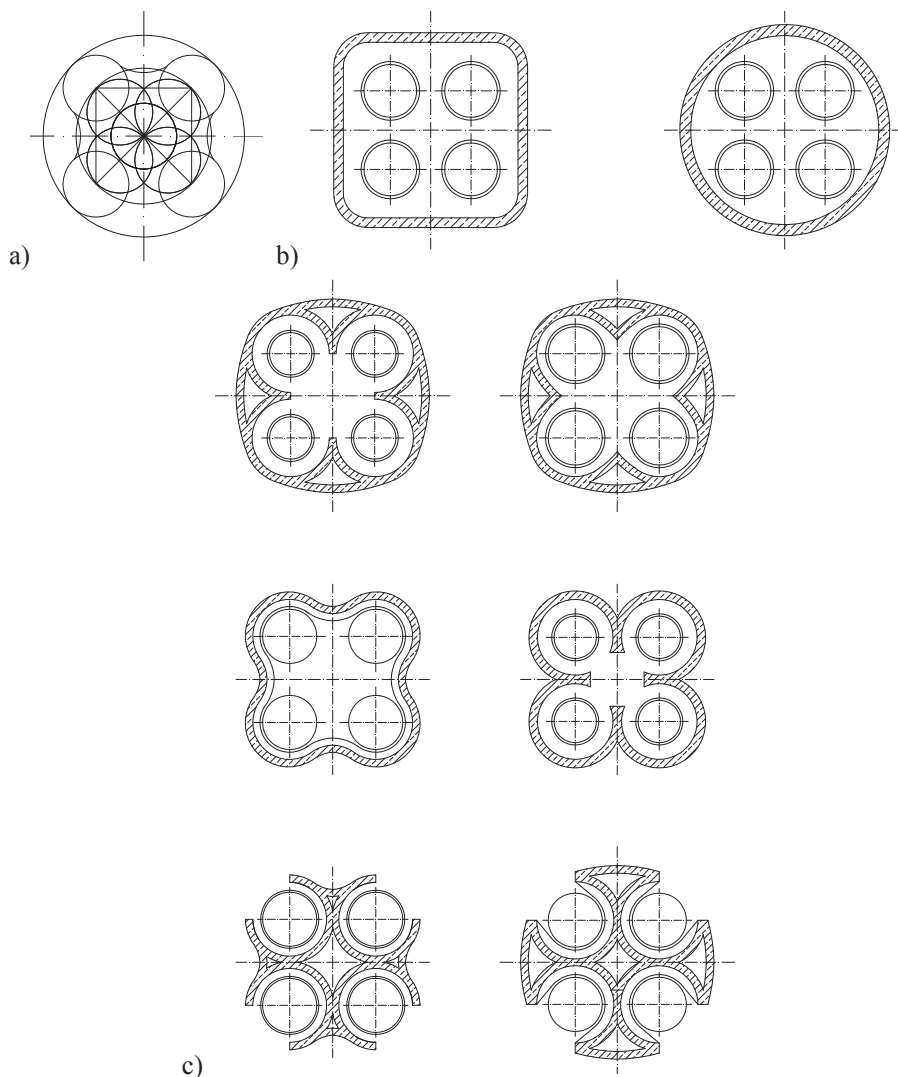
Rys. 1. Przekrój komina cylindrycznego: dwu-, trzy- i pięcioprzewodowego.
Fig. 1. The cross section of a two-, three- and five-flue cylindrical chimney.

Z czasem, ze względu na zbyt długie belki stropowe, obciążone ciężkimi przewodami spalinowymi, powstała koncepcja tzw. kominów wielokształtowych, w których trzon dopasowuje się swym kształtem do układu przewodów. Możliwość kształtowania przekrojów poprzecznych kominów wielokształtowych jest bardzo duża. Nie wszystkie koncepcje doczekały się realizacji. Na rysunkach 2 i 3 pokazano sposób kształtowania przekroju poprzecznego i różne koncepcje konstrukcyjne kominów trzyprzewodowych i czteroprzewodowych.



Rys. 2. Kominny trzyprzewodowe; a – sposób kształtowania przekrojów poprzecznych, b,c,d – koncepcje różnych konstrukcji.

Fig. 2. Three-flue chimneys; a – the way of formation the cross section, b, c, d – different conceptions of structure.



Rys. 3. Kominy czteroprzewodowe; a – sposób kształtowania przekrojów poprzecznych, b, c – koncepcje różnych konstrukcji.

Fig. 3. Four-flue chimneys; a – the way of formation the cross section, b, c – different conceptions of structure.

Podczas analizy rozwiązań konstrukcyjnych kominów wieloprzewodowych napotkać można szereg nowości pozwalających na praktyczne wykorzystanie odmiennego typu konstrukcji. Często występuje rozdzielenie konstrukcji nośnej od przewodów spalinowych. Sztywność kominów wieloprzewodowych zapewniają lekkie podesty belkowe, obecność których oraz wyposażenie w dźwigi towarowo-osobowe ułatwia dostęp i zapewnia warunki bezpieczeństwa podczas remontów, obsługi przewodów spalinowych, diagnostyki i napraw konstrukcji nośnej. Wentylowana przestrzeń pomiędzy przewodami a płaszczem obniża temperaturę odprowadzanych spalin w obrębie trzonu żelbetowego na tyle, iż możliwy jest okresowy pobyt ludzi bez konieczności wyłączenia całego kominu z użytkowania.

3. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych kominów wieloprzewodowych w Polsce

Najwięcej żelbetowych kominów wieloprzewodowych w Polsce zostało wzniesionych w latach siedemdziesiątych XX wieku. Zastosowane przy ich projektowaniu i budowie rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne były przedmiotem publikacji, które ukazały się w literaturze naukowo-technicznej w tym okresie np. [6-8] i latach następnych np. [9, 10].

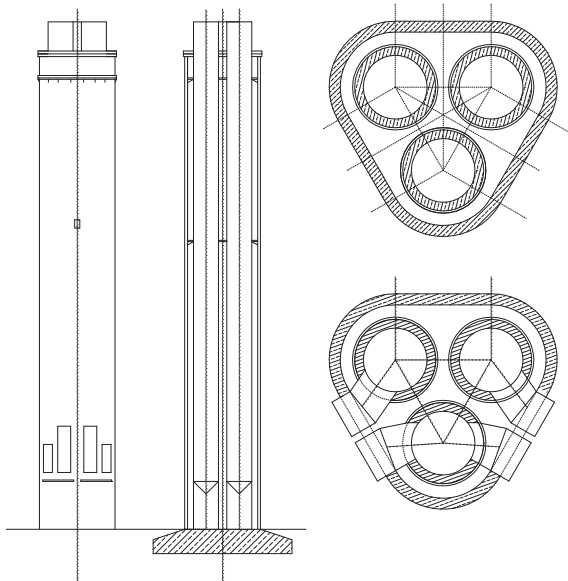
Przykładem kominą wieloprzewodowego o konstrukcji żelbetowej powłoki cylindrycznej jest sześcioprzewodowy komin elektrowni Opole o wysokości 250 m i średnicy przewodów po 6 m (Rys. 4). W środku znajduje się żelbetowy trzon wewnętrzny, w którym zamontowany jest dźwig towarowo – osobowy [6].



Rys. 4. Sześcioprzewodowy komin elektrowni Opole; a – przekrój, b – widok.

Fig. 4. The six-flue chimney in the power station in Opole; a – cross section, b – view.

Konstrukcję trzyprzewodowego kominą elektrowni Bydgoszcz o wysokości 73 m, który powstał w 1973 r., przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. Trzyprzewodowy komin elektrowni Bydgoszcz.

Fig. 5. The three-flue chimney in the power station in Bydgoszcz.

W Polsce najczęstszym rozwiązaniem żelbetowych kominów wieloprzewodowych są obiekty czteroprzewodowe silosowe, które ze względu na kształt przekroju poprzecznego nazywane są kominami typu „czterolistnej koniczynki”. Pierwszy tego typu komin o wysokości 150 m z przewodami ceramicznymi wznoszony był w latach 1972—73 w Elektrociepłowni Gdynia III (Rys. 6a). W kominie zastosowano przewody różniące się między sobą wymiarami: trzy przewody o średnicy 3,4 m a czwarty o średnicy 2,4 m. Taki sam komin, jeśli chodzi o konstrukcję trzonu i wysokość, został wykonany w 1975 roku w Elektrociepłowni I Huty Katowice. Zmianie, w porównaniu do komina Elektrociepłowni Gdynia III, uległy przewody wewnętrzne, które wykonano ze stali. W latach 1977 - 1979 wzniesiono dwa kolejne obiekty o przekroju czterolistnej koniczynki: 120-to metrowy komin w hucie Miedzi Głogów II i komin w Elektrociepłowni Lublin – Wrotków (Rys. 6b). W Elektrociepłowni II Huty Katowice wzniesiono w 1984 roku drugi komin czteroprzewodowy o średnicy przewodów 3,7 m. Przy jego wznoszeniu uwzględniono doświadczenia uzyskane przy budowie wcześniejszych obiektów, między innymi na przewody spalinowe zastosowano stal o podwyższonej odporności na korozję.



Rys. 6. Kominy czteroprzewodowe elektrociepłowni: a – w Gdyni, b – w Lublinie.

Fig. 6. The four-flue chimneys of heat and power generating plants: a – in Gdynia, b – in Lublin.

4. Projektowanie żelbetowych kominów wieloprzewodowych o złożonym kształcie

Kominy wieloprzewodowe burzą wyobrażenie o nieskomplikowanym, pod względem aerodynamicznym, kołowym kształcie przekroju. Pojawiają się także problemy z wyznaczeniem, w sposób dokładny, naprężeń w betonie i stali zbrojeniowej. Przy zwiększaniu ilości przewodów zmienia się przekrój poprzeczny, a zatem wygląd zewnętrzny komina, co zapewnia inne niż tradycyjne walory architektoniczne.

Dwoma istotnymi zagadnieniami występującymi przy projektowaniu kominów wieloprzewodowych, których nie obejmują przepisy normowe [1], są ustalenie właściwego, dla danego przekroju kominu, współczynnika oporu aerodynamicznego i określenie naprężeń w betonie i stali zbrojeniowej.

4.1. Współczynnik oporu aerodynamicznego

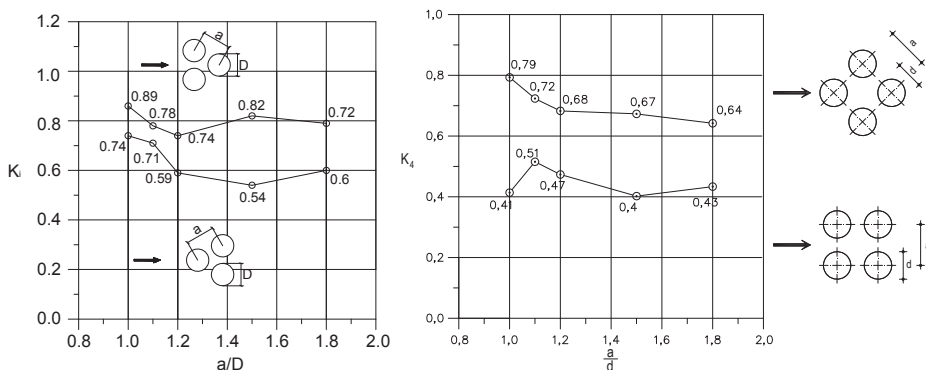
Norma do projektowania kominów murowanych i żelbetowych [1] jednoznacznie określa podstawowe założenia potrzebne do wyznaczenia współczynnika oporu aerodynamicznego C_x w przypadku kominów o przekrojach typowych. Dla przekroju kołowego wartość C_x zależy od stosunku całkowitej wysokości kominu H do średniej średnicy zewnętrznej jego przekroju D_{sr} :

$$C_x = 0,7(1 - 0,25 \log 25 \frac{D_{sr}}{H}), \quad \text{gdy} \quad \frac{H}{D_{sr}} \leq 25 \quad (1)$$

$$C_x = 0,7, \quad \text{gdy} \quad \frac{H}{D_{sr}} > 25 \quad (2)$$

W kominach wieloprzewodowych o złożonym przekroju poprzecznym współczynnik oporu aerodynamiczny C_x ustalany jest w sposób doświadczalny na podstawie badań wykonywanych w tunelu aerodynamicznym. Badania tego typu były prowadzone przez Żurańskiego [4] w Instytucie Lotnictwa w Warszawie na modelach w postaci wiązek 2, 3 i 4 sztywnych walców kołowych ustawionych w różnej odległości między osiami walców a , wynoszącej od $a=D$ (na styk) do $a=1,8D$. Na podstawie wyników badań uzyskano podstawową charakterystykę aerodynamiczną układu walców tj. współczynnik oporu aerodynamicznego C_x , aerodynamiczną siłę boczną C_y i moment aerodynamiczny C_m w zależności od względnej odległości między osiami walców a/D oraz od kierunku działania wiatru. Na Rys. 7 przedstawiono wyznaczone wartości współczynnika interferencji K_i określającego względną wartość współczynnika oporu aerodynamicznego układu walców C_{x_n} w odniesieniu do współczynnika dla jednego walca C_{x_1} .

$$K_i = \frac{C_{x_n}}{C_{x_1}}. \quad (3)$$



Rys. 7. Wartości współczynnika interferencji K_i dla układu: a – trzech, b – czterech walców.
Fig. 7. Coefficient K_i for the arrangement of: a – three, b – four cylinders.

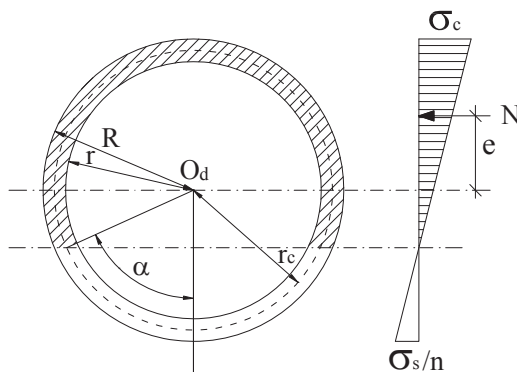
Przy projektowaniu kominów wieloprzewodowych, o przekroju w kształcie trójlistnej i czterolistnej koniczynki, obciążenie wiatrem należy wyznaczać na podstawie zmodyfikowanego wzoru zaproponowanego w [4]:

$$p_k = q_k \cdot C_e \cdot [K_i \cdot C_{x1} \cdot D \cdot n] \cdot \beta, \quad (4)$$

w którym: q_k – charakterystyczne ciśnienie prędkości wiatru wg [11], C_e – współczynnik ekspozycji wg [11], K_i – współczynnik interferencji wg Rys. 7, odczytywany przy $a/D=1$, C_{x1} – współczynnik oporu aerodynamicznego wg [1], odczytywany jak dla kominu cylindrycznego o wymiarach jednego przewodu kominu wieloprzewodowego, D – średnica zewnętrzna pojedynczego przewodu, n – liczba przewodów w kominie, β – współczynnik działania porywów wiatru wg [11].

4. 2. Obliczanie naprężeń w kominach żelbetowych

Norma do projektowania kominów murowanych i żelbetowych [1] zawiera wytyczne do wyznaczenia naprężeń normalnych ściskających w betonie i rozciągających w stali jedynie w przekroju pierścieniowym kominu (Rys. 8).



Rys. 8. Rozkład naprężeń w przekroju pierścieniowym mimośrodkowo ściskanym.
Fig. 8. Stress distribution in annular cross section under eccentric compression.

Naprężenia w betonie σ_c i w stali σ_s , wg normy [1], można obliczać dla przekroju pierścieniowego kominu żelbetowego ze wzorów:

$$\sigma_c^{\max} = \frac{N}{A_c} \cdot B, \quad (5)$$

$$\sigma_s^{\max} = \sigma_c^{\max} \cdot C, \quad (6)$$

w których: N – siła ściskająca prostopadła do przekroju, A_c – pole przekroju poprzecznego betonu

$$B = \frac{\pi(1 + \cos \alpha)}{\sin \alpha + [-\alpha + \pi(1 + n \cdot \rho) \cos \alpha]}, \quad (7)$$

$$C = n \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (8)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c}. \quad (9)$$

Występujący we wzorach (7) i (8) kąt α , określający położenie osi obojętnej przekroju, oblicza się wg wzoru:

$$\frac{e}{r_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,5 \sin 2\alpha - \alpha + \pi(1 + n \cdot \rho)}{\sin \alpha + [-\alpha + \pi(1 + n \cdot \rho)] \cos \alpha}, \quad (10)$$

w którym: e – mimośród siły ściskającej wynoszący:

$$e = \frac{M}{N}, \quad (11)$$

r_c – promień okręgu wyznaczający położenie środka ciężkości pierścienia betonowego, ρ – stopień zbrojenia.

W przepisach normowych brak jest natomiast procedur odnośnie określania naprężeń w betonie i stali w kominach wielokształtowych. Zagadnienie, które sprządza się do sposobu wyznaczania współczynników B i C , było przedmiotem analiz prowadzonych przez Lechmana [2, 3]. W swoich rozważaniach autor szczegółowo zajmował się przekrojem pierścieniowym pełnym i osłabionym otworami z dodatkowym zbrojeniem przy otworach w kominie jedнопrzewodowych i dwuprzewodowym. Podał również podstawowe założenia do wyznaczenia naprężeń w kominach wielokształtowych o większej ilości przewodów. Główne założenia przyjęte do obliczeń to: płaskość przekrojów, jednowymiarowość stanu odkształcenia i naprężenia, przyjęcie, że grubość pierścienia jest niższego rzędu niż promień zewnętrzny.

Jeżeli cały przekrój znajduje się w strefie ściskanej, naprężenia w betonie i stali można określić na podstawie ogólnych wzorów wytrzymałości materiałów, w przeciwnym przypadku niezbędne jest znalezienie położenia osi obojętnej przekroju. W rozwiązaniu zaproponowanym w [4], bazuje się na równaniu równowagi momentów sił w przekroju względem prostej prostopadłej do osi symetrii i przechodzącej przez punkt przyłożenia wypadkowej siły ściskającej N :

$$\sum M_{\gamma-\gamma} = 0, \quad (12)$$

$$\int_{A_c} \sigma_c (e + v_c) dA_c + \int_{A_s} \sigma_s (e + v_s) dA_s = 0, \quad (13)$$

gdzie: e – mimośród siły N , v_c – odległość środka ciężkości nieskończenie małego wycinka pierścieniowego przekroju betonu do środka ciężkości całego przekroju poziomego kominu, v_s – odległość środka ciężkości nieskończenie małego wycinka przekroju stali do środka ciężkości całego przekroju poziomego kominu, dA_c – różniczka pola betonu, dA_s – różniczka pola zbrojenia, A_c – pole powierzchni betonu, A_s – pole powierzchni zbrojenia.

Uwzględniając w równaniu równowagi momentów związki konstytutywne dla betonu i stali oraz zależności geometryczne, otrzymuje się równanie określające położenie osi obojętnej przekroju:

$$\frac{e}{r_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1-\rho) \cdot X_c(\alpha) + n \cdot \rho \cdot X_s(\alpha)}{(1-\rho) \cdot Y_c(\alpha) + n \cdot \rho \cdot Y_s(\alpha)}, \quad (14)$$

gdzie: X_c , X_s , Y_c , Y_s – funkcje kąta α zależne od kształtu geometrycznego przekroju oraz położenia osi obojętnej.

Procedurę określania funkcji X_c , X_s , Y_c , Y_s w przypadku komina trzy i cztero-przewodowego o przekroju w kształcie trójlistnej i czterolistnej koniczynki, przedstawiono w artykułach zamieszczonych na następnych stronach tego Zeszytu Naukowego. Zestawione zostały tam również wartości współczynników B i C , służące do wyznaczenia naprężeń normalnych w przekrojach tego typu obiektów, natomiast szczegółowe obliczenia można znaleźć w pracach [12] i [13].

Literatura

- [1] PN-88/B-03004, *Kominy murowane i żelbetowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [2] Lechman M., *Nośność i wymiarowanie przekrojów pierścieniowych elementów mimośrodowo ściskanych*, Wydawnictwa Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2006.
- [3] Lechman M., Lewiński P., *Wyznaczanie naprężeń normalnych w żelbetowych kominach wieloprzewodowych*, Inżynieria i Budownictwo, nr 11/1993.
- [4] Żurański J., *Wpływ interferencji aerodynamicznej na obciążenie wiatrem stalowych kominów wieloprzewodowych*, Prace Instytutu Techniki Budowlanej, Kwartalnik nr 2-3/2000.
- [5] Żurański J., Józwiak R., *Obciążenie wiatrem stalowych kominów wieloprzewodowych*, XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1999.
- [6] Cieślik J., Mateja O., *Sześcioprzewodowy komin przemysłowy o wysokości 250m*, Inżynieria i Budownictwo, nr 7-8/1976.
- [7] Cieślik J., Mateja O., Tarczyński L., *Wieloprzewodowe kominy przemysłowe*, Inżynieria i Budownictwo, nr 4/1974.
- [8] Mateja O., Cieślik J., *Czteroprzewodowy komin przemysłowy huty Katowice*, Problemy Projektowe Hutnictwa i Przemysłu Maszynowego, nr 12/1977.
- [9] Cieślik J., *Nowe konstrukcje kominów przemysłowych*, Przegląd Budowlany, nr 12/1989.
- [10] Rudzicki J., *Projektowanie i wykonawstwo kominów przemysłowych w doświadczeniach przedsiębiorstwa montażu i dostaw pieców tunelowych „Bipropiec” – Kraków*, Przegląd Budowlany, nr 12/1989.
- [11] PN-77/B-02011, *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem*.
- [12] Dobrowolska M., *Projekt komina przemysłowego trzyprzewodowego o konstrukcji żelbetowej*, WIBiS, Politechnika Lubelska, Lublin 2008 (praca magisterska).
- [13] Borzęcki K., *Projekt komina przemysłowego czteroprzewodowego o konstrukcji żelbetowej*, WIBiS, Politechnika Lubelska, Lublin 2008 (praca magisterska).

Dimensioning of reinforced concrete multi – flue chimneys

Marta Słowik, Małgorzata Dobrowolska, Krzysztof Borzęcki

*Lublin University of Technology, Faculty of Civil and Sanitary Engineering,
e-mail: m.slowik@pollub.pl*

Abstract: In the paper there are presented the basic principles of dimensioning of reinforced concrete multi-flue industrial chimneys. The calculation problems appear when the cross section is more complicated than simple annular one, for which there are rules in the code. Different concepts of multi-flue chimneys, especially three-flue and four-flue chimneys, are described and the examples of industrial chimneys built in Poland are given as well.

Key words: reinforced concrete structures, industrial multi-flue chimneys.