

ka wykonano powłoki zabezpieczające. Następnie przeprowadzono próbę szczelności zgodnie z normą PN-B-10702:1999 [9]. Na rysunku 7 przedstawiono widok na ścianę zbiornika po wykonaniu ich zewnętrznego sprężenia.

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono przypadek żelbetowego zbiornika cylindrycznego, w którym podczas wykonywania próby szczelności doszło do licznych przecieków. Pomimo podjętej próby iniekcji, przecieków całkowicie nie zatamowano. Podobny przykład uszkodzenia zbiornika przedstawiono w pracy [10]. Zdaniem autorów, doprowadziły do tego błędy wykonawcze (nieodpowiednie zagęszczenie mieszanki betonowej, niewłaściwe wykonanie powłok zabezpieczających i z dużym prawdopodobieństwem niewłaściwa pielęgnacja betonu – obiekt wykonywano w upalne dni).

Autorzy zaproponowali dwie koncepcje naprawy. Wybrano koncepcję z zewnętrznym sprężeniem ścian zbiornika, którą zrealizowano. Obecnie zbiornik jest użytkowany i nie ma przecieków.

Dodatkowo należałoby powiedzieć, że przy takich wymiarach obiektu bardziej ekonomicznym i pewnym rozwiązaniem byłoby jego zaprojektowanie jako konstrukcji sprężonej. Konstrukcja żelbetowa miała

duże średnice prętów i bardzo małe rozstawy, co też mogło wpływać na trudności w prawidłowym zagęszczeniu betonu.

## LITERATURA

- [1] Obliczenia statyczne i wytrzymałościowe wraz z rysunkami dla żelbetowej komory fermentacyjnej w oczyszczalni ścieków miasta Bolestawiec. Projekt budowlany obiektu
- [2] PN-B-03264:2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [3] Flaga K., Naprężenia skurczowe i zbrojenie przypowierzchniowe w konstrukcjach betonowych. Monografia 295, Politechnika Krakowska, Kraków 2004
- [4] Dyduch K., Wybrane problemy obliczeń konstrukcji sprężonych w ujęciu normy PN-B-03264:1999 i w świetle Eurokodu 2. Inżynieria i Budownictwo nr 4-5/2000
- [5] Seruga A., Straty opóźnione i ich wpływ na wartość siły w ciągnie sprężającym betonowe konstrukcje kołowo-symetryczne. Inżynieria i Budownictwo nr 4-5/2000
- [6] Procedura realizacji 2017. Zakotwienie X. Sprężenie zewnętrzne kablami NSS z zakotwieniem X. Umieszczenie kabli i zakotwień na konstrukcji. Freyssinet Polska
- [7] Procedura realizacji 2018. Zakotwienie X. Sprężenie zewnętrzne kablami NSS z zakotwieniem X. Naciąganie kabli. Freyssinet Polska
- [8] Procedura realizacji 2019. Zakotwienie X. Sprężenie zewnętrzne kablami NSS z zakotwieniem X. Iniekcja osłonek z PEHD oraz zabezpieczenie zakotwień i końcówek kabli. Freyssinet Polska
- [9] PN-B-10702:1999. Wodociągi i kanalizacja. Zbiorniki. Wymagania i badania przy odbiorze
- [10] Buczkowski W., On causes of the formation of scratches in a cylindrical tank with abruptly changing wall thickness. Fracture Mechanics and Physics of Construction Materials and Structures. The National Academy of Sciences of Ukraine. Lviv 2007

# Wpływ metody określania obciążenia wiatrem kominów żelbetowych na wielkość sił wewnętrznych

Dr inż. Krystyna Wróbel, Politechnika Rzeszowska

## 1. Założenia przyjęte do analizy

W referacie przeanalizowano wpływ sposobu obciążenia wiatrem komina w linii działania obciążenia na wielkość sił wewnętrznych. Analizę przeprowadzono na bazie komina żelbetowego, cylindrycznego o wysokości 150 m.

## 2. Obciążenie wiatrem komina wg PN-B [1, 2, 3]

Obciążenie charakterystyczne wywołane działaniem wiatru  $p_k$  wyznacza się ze wzoru:

$$p_k = q_k \cdot C_e \cdot C_x \cdot \beta \cdot \gamma_d \quad (2.1)$$

Z uwagi na fakt, iż procedura obliczeniowa wg norm [1, 2, 3] jest znana, pominięto omawianie tego zagadnienia. Na rysunku 2 i w tabeli 2 podano wyniki obliczeń.

## 3. Obciążenie wiatrem komina wg PN-EN [4, 5, 6]

Obciążenie wiatrem określone wg wymienionych norm i przyłożono na dwa sposoby:

**Tabela 1.** Parametry analizowanego kominia

<p>a) średnica zewnętrzna dolna trzonu kominia: 10,40 m,                  b) średnica zewnętrzna górna trzonu kominia: 7,40 m,                  c) komin o przekroju pierścieniowym i zmiennej gr. ścian,                  d) rodzaj wykładziny: PENNGU-ARD® o grubości 0,1 m,                  e) komin przeznaczony dla kotłowni węglowej,                  f) prędkość przepływu gazów: 15 m/s,                  g) temperatura eksploatacyjna gazów: 150°C,                  h) pochylenie tworzącej kominia: 1,0%,                  i) lokalizacji kominia: 1 strefa obciążenia wiatrem, kategoria terenu A wg [1 i 2]; 1 strefa obciążenia wiatrem, kategoria terenu II wg [4].</p>	
---	--

sposób I – na płaszczyznę pionową (na średnicę) wg schematu analogicznego jak wg PN-B,  
 sposób II – w postaci sił skupionych po obwodzie kominia wg zaleceń PN-EN.

**3.1. Obciążenie wiatrem wg PN-EN 1991-1-4 [4] – sposób I**

Obciążenie charakterystyczne wywołane działaniem wiatru  $p_k$  wg rozdziału 5 [4]:

$$p_k = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \tag{3.1}$$

gdzie:  $c_s c_d$  – współczynnik konstrukcyjny;  $c_f$  – współczynnik oporu aerodynamicznego;  
 $q_p(z_e)$  – szczytowe ciśnienie prędkości na wysokości  $z_e$ .  
 Bazowa prędkość wiatru  $v_b$  wg pkt. 4.2 [4]:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \tag{3.2}$$

gdzie:  $c_{dir} = 1,0$  – współczynnik kierunkowy wg pkt. 5.2.3.2.2 [5];  $c_{season} = 1,0$  – współczynnik sezonowy wg pkt. j.w.;  $v_{b,0} = 22$  m/s – wartość podstawowa bazowej prędkości wiatru wg tabl. NA.1 [4] dla I strefy wiatrowej, zatem:

$$v_b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 22 = 22 \text{ m/s}$$

Średnia prędkość wiatru  $v_m(z)$  wg pkt. 4.3.1 [4]:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \tag{3.3}$$

gdzie:  
 $c_r(z)$  – współczynnik chropowatości terenu wg tabl. NA.3, obligatoryjnie w przypadku kominów – kategoria terenu II

$$c_r(z) = 1,0 \cdot (z/10)^{0,17} \tag{3.4}$$

$z = 150$  m – wysokość rozpatrywanego przekroju nad poziomem terenu,

$$c_r(z) = 1,0 \cdot (150/10)^{0,17} = 1,59$$

$c_o(z) = 1,0$  – wartość współczynnika rzeźby terenu wg pkt. 4.3.3,

$$v_m(z) = 1,59 \cdot 1,0 \cdot 22 = 34,86 \text{ m/s}$$

Turbulencja wiatru  $I_v(z)$  wg pkt. 4.4 [4]:

$$I_v(z) = \sigma_v(z)/v_m(z) = k_r/c_o(z) \cdot \ln(z/z_0) \text{ dla } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \text{ dla } z < z_{min} \tag{3.5}$$

gdzie:

$\sigma_v$  – odchylenie standardowe składowej fluktuacyjnej prędkości wiatru:

$$\sigma = k_r \cdot v_b \cdot k_f \tag{3.6}$$

gdzie:

$k_r$  – współczynnik terenu określany wg pkt.4.3.2:

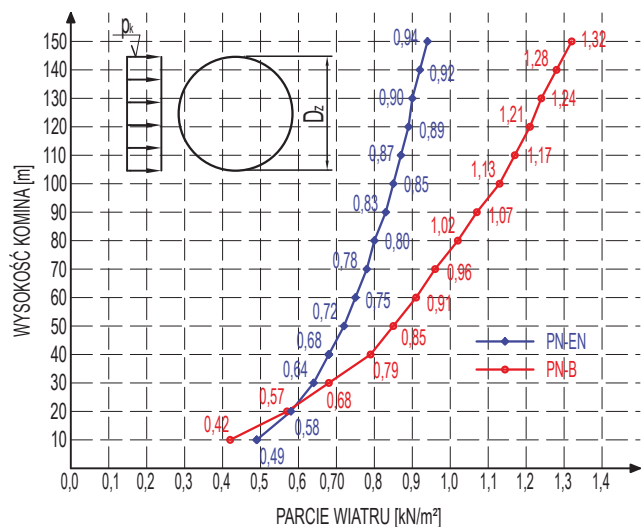
$$k_r = 0,19 \cdot (z_0/z_{0,II})^{0,07} \tag{3.7}$$

$k_f = 1,0$  – współczynnik turbulencji;  $z_0 = 0,05$ m – wymiar chropowatości wg tabl. 4.1 [4];  $v_m(z) = 34,86$  m/s – średnia prędkość wiatru,  $z_{0,II} = 0,05$ m – wymiar chropowatości wg tabl. 4.1 dla kategorii terenu II,

$$k_r = 0,19 \cdot (0,05\text{m}/0,05\text{m})^{0,07} = 0,19;$$

$$\sigma_v = 0,19 \cdot 22 \cdot 1,0 = 4,18 \text{ m/s}$$

$$I_v(z) = \frac{4,18}{34,86} = 0,12$$



**Rys. 2.** Porównanie wartości parcia wiatru  $p_k$  na komin określonego wg PN-B i PN-EN sposób I

**Tabela 2.** Porównanie momentów zginających w trzonie komina od obciążenia wiatrem

Segment	M <sub>Sd</sub>	M <sub>Ed</sub> <sup>I</sup>	M <sub>Ed</sub> <sup>II</sup>	M <sub>Sd</sub> / M <sub>Ed</sub> <sup>I</sup>	M <sub>Sd</sub> / M <sub>Ed</sub> <sup>II</sup>	M <sub>Ed</sub> <sup>I</sup> / M <sub>Ed</sub> <sup>II</sup>
[-]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[%]	[%]	[%]
I	741,00	526,50	543,84	140,7	136,3	103,3
II	2962,50	2010,50	2180,87	140,4	135,8	103,3
III	6660,00	4761,00	4920,86	139,9	135,3	103,4
IV	11826,75	8485,50	8771,44	139,4	134,8	103,4
V	18453,00	13289,25	13737,85	138,9	134,3	103,4
VI	26526,00	19174,50	19822,40	138,3	133,8	103,4
VII	36020,25	26140,50	27024,55	137,8	133,3	103,4
VIII	46896,00	34183,50	35340,14	137,2	132,7	103,4
IX	59109,00	43295,25	44760,50	136,5	132,1	103,4
X	72611,25	53462,25	55271,93	135,8	131,4	103,4
XI	87349,50	64665,00	66854,14	135,1	130,7	103,4
XII	103263,75	76875,75	79477,89	134,3	129,9	103,4
XIII	120225,00	90054,00	93101,89	133,5	129,2	103,4
XIV	138182,25	104140,50	107665,57	132,7	128,3	103,4
XV	156868,50	119040,75	123071,03	131,8	127,5	103,4

Wartość szczytowa ciśnienia prędkości q<sub>p</sub>(z) wg pkt. 4.5 [4]:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot (v_m(z))^2 = c_e(z) \cdot q_b \quad (3.8)$$

gdzie:

ρ = 1,25 kg/m<sup>3</sup> – gęstość powietrza,

c<sub>e</sub>(z) – współczynnik ekspozycji określany wg tabl. NA.3, dla kategorii terenu II:

$$c_e(z) = 2,3 \cdot (z/10)^{0,24} \quad (3.9)$$

$$c_e(z) = 2,3 \cdot (150/10)^{0,24} = 4,41$$

q<sub>b</sub> – wartość bazowa ciśnienia prędkości określana ze wzoru:

$$q_b = 1/2 \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (3.10)$$

$$q_b = 1/2 \cdot 1,25 \cdot (22)^2 = 0,30 \text{ kN/m}^2$$

Współczynnik oporu aerodynamicznego c<sub>f</sub>:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (3.11)$$

gdzie:

c<sub>r,0</sub> – współczynnik oporu aerodynamicznego walca bez wpływu swobodnego końca, określany wg rysunku 7.28 [4]:

$$c_{f,0} = 0,18 \cdot \log \left[ 10 \frac{k}{b} \right] / 1 + 0,4 \cdot \log \left[ \frac{R_e}{10^6} \right] \quad (3.12)$$

gdzie:

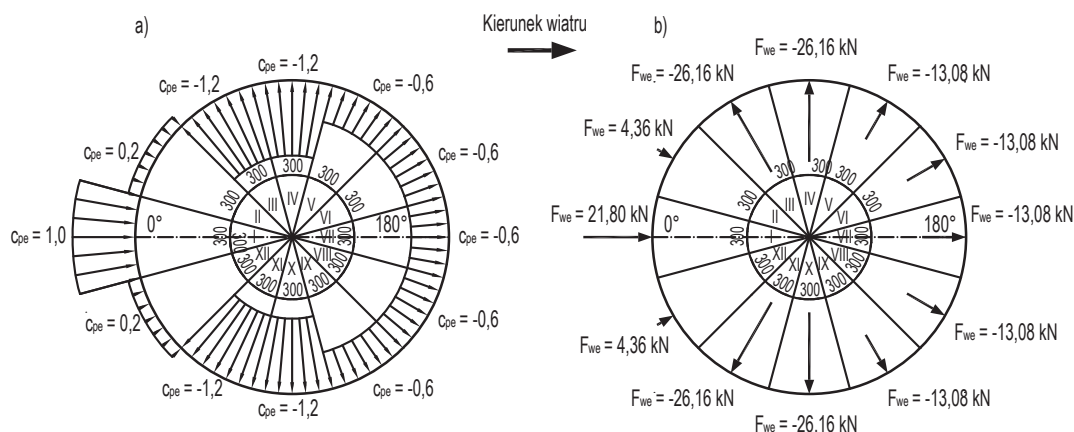
k = 1 mm – chropowatość wg tabl. 7.13 dla betonu surowego; b = D<sub>sr</sub> = 8,9 m – średnia średnica komina; R<sub>e</sub> = 3 × 10<sup>7</sup> – wartość liczby Reynoldsa wg pkt. 7.9.1 [4]

$$c_{f,0} = 0,18 \cdot \log \left[ 10 \frac{0,001}{8,9} \right] / 1 + 0,4 \cdot \log \left[ \frac{3 \cdot 10^7}{10^6} \right] = 0,86$$

$$c_f = 0,86 \cdot 0,7 = 0,60$$

Współczynnik konstrukcyjny c<sub>s,c<sub>d</sub></sub> wg rozdziału 6 [4]:

$$c_s c_d = 1 + 2k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2} / 1 + 7 \cdot I_v(z_s) \quad (3.13)$$



**Rys. 3.**  
a) Rozkład współczynnika ciśnienia zewnętrznego na obwodzie komina;  
b) Oddziaływanie wiatru na SEGMENT I komina (wg PN-EN sposób II)

gdzie:

$z_s = 0,6 H = 0,6 \cdot 150 \text{ m} = 90 \text{ m}$  – wysokość odniesienia. Współczynnik wartości szczytowej  $k_p$  można określić z wykresu na rysunku B.2 lub ze wzoru B.4 [4]:

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + 0,6 / \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} \geq 3 \quad (3.14)$$

gdzie:

$v$  – częstość przewyższania wg pkt. B.2(4),  $T$  – czas uśredniania prędkości średniej wiatru,  $T = 600 \text{ s}$ ,  $k_p = 3,28$ ,  $I_v(z_s) = 0,13$  – intensywność turbulencji na wysokości odniesienia  $z_s$ ;  $B^2 = 0,56$  – wartość współczynnika odpowiedzi pozarezonansowej,  $R^2 = 1,45$  – wartość współczynnika odpowiedzi rezonansowej

$$c_s c_d = \frac{1}{1 + 7 \cdot 0,13} \cdot (1 + 2 \cdot 3,28 \cdot 0,13 \cdot \sqrt{0,56 + 1,45}) = 1,16$$

### 3.2. Obciążenie wiatrem wg PN-EN 1991-1-4 [4] sposób II

Wypadkową siłę wywieraną przez wiatr na konstrukcję lub element konstrukcyjny oblicza się na podstawie rozdziału 5 [4] ze wzoru:

$$F_{we} = c_s c_d \cdot \sum (w_e \cdot A_{ref}) \quad (3.15)$$

gdzie:

$c_s c_d = 1,16$  – współczynnik konstrukcyjny;  $A_{ref}$  – pole rozpatrywanego elementu powierzchni,  $w_e$  – wewnętrzne ciśnienie wiatru na element powierzchni określane ze wzoru:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (3.16)$$

gdzie:  $q_p(z_e) = 1,33 \text{ kN/m}^2$  – wartość szczytowa ciśnienia prędkości;  $z_e$  – wysokość odniesienia dla ciśnienia zewnętrznego;  $c_{pe}$  – współczynnik ciśnienia zewnętrznego zależny od liczby Reynoldsa, wg pkt. 7.9.1 [4]:

$$c_{pe} = c_{p,0} \cdot \Psi_{\lambda\alpha} \quad (3.17)$$

gdzie:  $c_{p,0}$  – współczynnik ciśnienia walca kołowego bez wpływu swobodnego końca.

Wartości odczytane z tabl. 7.12 [4] dla  $R_e = 3 \times 10^7$ :  $\alpha_{min} = 75^\circ$  – kąt określający miejsce najniższego ciśnienia,  $c_{p0,min} = -1,5$  – najmniejsza wartość współczynnika ciśnienia,  $\alpha_A = 105^\circ$  – kąt określający miejsce oderwania przepływu,  $c_{p0,h} = -0,8$  – współczynnik bazowy ciśnienia;  $\Psi_{\lambda\alpha}$  – współczynnik wpływu swobodnego końca obliczany wg wyrażenia (7.17) [4] w zależności od wartości kąta  $\alpha$  (kąt  $\alpha$  wg rysunku 7.27):

$$\begin{aligned} \Psi_{\lambda\alpha} &= 1 & \text{dla } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{min} \\ \Psi_{\lambda\alpha} &= \Psi_\lambda + (1 - \Psi_\lambda) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2} \cdot (\alpha - \alpha_{min} / \alpha_A - \alpha_{min})\right] & \text{dla } \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_A \\ \Psi_{\lambda\alpha} &= \Psi_\lambda & \text{dla } \alpha_A \leq \alpha \leq 180^\circ \end{aligned} \quad (3.18)$$

gdzie:  $\Psi_\lambda = 0,7$  – współczynnik wpływu swobodnego końca wg pkt. 7.13 (zależny od smukłości efektywnej  $\lambda$ ;  $\lambda = 12$  wg tabl. 7.16 dla  $l = 150 \text{ m}$  i  $b = 8,9 \text{ m}$  oraz współczynnika wypełnienia  $\phi = 1,0$  wg rys. 7.37);  $c_{p,0}$  – współczynnik ciśnienia walca kołowego bez wpływu swobodnego końca określane na podstawie rysunku 7.27 w zależności od liczby Reynoldsa i kąta  $\alpha$ . Porównanie momentów zginających w trzonie komina od obciążenia wiatrem wszystkimi trzema metodami obliczonych zgodnie z [3, 5, 6] przedstawiono w tabeli 2.

### 4. Wnioski i podsumowanie

1. Analiza porównawcza obciążenia wiatrem komina wg norm polskich i europejskich, gdzie obciążenie przykładowe jest zgodnie z modelem uproszczonym „na średnicę” wykazała, że obciążenie to wyliczone wg norm polskich [1, 2, 3] (rys. 2.) przy podstawie jest o 17% mniejsze i różnica ta maleje do poziomu +20 m, natomiast od tego poziomu do wierzchołka obciążenie określone wg norm polskich rośnie w stosunku do obciążenia określonego wg norm europejskich [4, 5, 6]. Przy wierzchołku różnica ta przekracza 40%.

2. Nie ma możliwości bezpośredniego porównania wielkości parcia wiatru określonego na podstawie PN-EN z zastosowaniem modelu uproszczonego i dokładnego.

3. Z porównania momentów zginających wywołanych obciążeniem wiatrem na trzy sposoby (tabela 2.) wynika:

- moment zginający określony wg PN-B jest większy od momentu zginającego określonego wg PN-EN sposób I, różnica ta wynosi od 31,8% przy podstawie do 40,7% przy wierzchołku,
- różnica pomiędzy wartościami momentów zginających określonych wg PN-EN przy dwóch różnych sposobach przyłożenia obciążenia wiatrem jest stała wzdłuż wysokości komina, a wartości momentów zginających wyliczone dla modelu dokładnego obciążenia są o 3,3÷3,4% wyższe niż dla modelu uproszczonego.

Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że uproszczony model obciążenia komina wiatrem wg PN-EN (sposób I) wykazuje bardzo dobrą zgodność z modelem dokładnym (sposób II).

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-77/B-02011 Obciążenia budowli. Obciążenia wiatrem.
- [2] Poprawka do ww. normy: PN-B02011:1977/Az1 lipiec 2009.
- [3] PN-88/B-03004 Kominy murowane i żelbetowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [4] PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru. Listopad 2008 wraz z poprawkami
- [5] PN-EN 13084-1 Kominy wolnostojące- Część 1: Wymagania ogólne. Lipiec 2007
- [6] PN-EN 13084-2 Kominy wolnostojące- Część 2: Kominy betonowe. Lipiec 2007