

konstrukcji poddanych od-
zty i kominy (ang.)

owe i sprężone

Obliczenia statyczne i pro-

w pierścieniowych elemen-
owe Instytutu Techniki Bu-
techniki Budowlanej, War-

Wyznaczanie obciążenia wiatrem kominów żelbetonowych według PN-EN 1991-1-4

Z1.1. Postanowienia ogólne

W normie podano ogólne zasady określania wartości charakterystycznych od-
działywania wiatru na budowle, których wysokość nie przekracza 200 m. W nor-
mie opisano odpowiedź dynamiczną na wymuszenie turbulentne w linii wiatru,
będące w rezonansie z podstawową postacią drgań giętych konstrukcji o tym sa-
mym kierunku i tego samego znaku.

Najważniejsze postanowienia zawarte w Załączniku Krajowym NA w odniesie-
niu do kominów żelbetonowych dotyczą:

-- podziału obszaru Polski na trzy strefy obciążenia wiatrem (rys. NB.1 normy),
którym odpowiadają wartości strefowe podstawowej wartości bazowej i ciśnienia
prędkości wiatru podane w tabelicy 1 tej normy,

-- założenia, iż kominy umieszczone są w terenie kategorii II,

-- przyjmowania zalecanych wartości współczynnika kierunkowego $c_{dir} = 1,0$
i współczynnika sezonowego $c_{season} = 1,0$.

Według normy PN-EN 1991-1-4:2008 wartości p_k jednostkowego obciążenia
charakterystycznego wywołanego działaniem wiatru wyznacza się na podstawie
zależności

$$p_k = c_{sc} \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \quad (Z1.1)$$

gdzie: $q_p(z_e)$ – szczytowe ciśnienie prędkości na wysokości z_e ,

c_f – współczynnik oporu aerodynamicznego,

c_{sc} – współczynnik konstrukcyjny.

Szczytowe ciśnienie prędkości $q_p(z_e)$ na wysokości z_e oblicza się na podstawie
wzorów podanych w p. Z1.2.

Współczynnik oporu aerodynamicznego c_f określa się na podstawie postano-
wień w p. Z1.3.

Współczynnik konstrukcyjny c_{sc} jest obliczany według procedury podanej
w p. Z1.4 (Załącznik B normy).

Z1.2. Szczytowe ciśnienie prędkości $q_p(z_e)$

Bazową prędkość wiatru oblicza się, korzystając z wyrażenia (Z1.2):

$v_{b,0}$ – wartość podstawowa bazowej prędkości wiatru,
 c_{dir} – współczynnik kierunkowy, $c_{dir} = 1,0$,
 c_{season} – współczynnik sezonowy, $c_{season} = 1,0$.

Wartości strefowe podstawowej bazowej prędkości i ciśnienia prędkości wiatru, odniesione do terenu Polski, zestawiono w tabelicy Z1.1.

Tablica Z1.1. Wartości strefowe podstawowej wartości bazowej prędkości i ciśnienia prędkości wiatru; a – wysokość nad poziomem morza, m

Strefa	$v_{b,0}$, m/s	$v_{b,0}$, m/s	$q_{b,0}$, kN/m ²	$q_{b,0}$, kN/m ²
	$a \leq 300$ m	$a > 300$ m	$a \leq 300$ m	$a > 300$ m
1	22	$22 \cdot [1 + 0,0006(a - 300)]$	0,30	$0,30 \cdot [1 + 0,0006(a - 300)]^2$
2	26	26	0,42	0,42
3	22	$22 \cdot [1 + 0,0006(a - 300)]$	0,30	$0,30 \cdot [1 + 0,0006(a - 300)]^2 \cdot \left[\frac{20000 - a}{20000 + a} \right]$

Średnia prędkość wiatru $v_m(z)$ na wysokości z nad poziomem terenu zależy od chropowatości i rzeźby terenu oraz od bazowej prędkości wiatru, v_b , i jest wyznaczana ze wzoru (Z1.3)

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (Z1.3)$$

gdzie:

$c_r(z)$ – współczynnik chropowatości, podany w tabelicy Z1.2,
 $c_o(z)$ – współczynnik rzeźby terenu (orografii), $c_o(z) = 1,0$.

Wzory do obliczania współczynników chropowatości i ekspozycji zestawiono w tabelicy Z1.2. Współczynnik chropowatości, $c_r(z)$, uwzględnia zmienność prędkości wiatru w miejscu lokalizacji konstrukcji w zależności od:

- wysokości nad poziomem gruntu,
- chropowatości terenu od strony rozpatrywanego kierunku wiatru.

$v_{b,0}$ – wartość podstawowa bazowej prędkości wiatru,
 c_{dir} – współczynnik kierunkowy, $c_{dir} = 1,0$,
 c_{season} – współczynnik sezonowy, $c_{season} = 1,0$.

Wartości strefowe podstawowej bazowej prędkości i ciśnienia prędkości wiatru, odniesione do terenu Polski, zestawiono w tablicy Z1.1.

Tablica Z1.1. Wartości strefowe podstawowej wartości bazowej prędkości i ciśnienia prędkości wiatru; a – wysokość nad poziomem morza, m

Strefa	$v_{b,0}$, m/s	$v_{b,0}$, m/s	$q_{b,0}$, kN/m ²	$q_{b,0}$, kN/m ²
	$a \leq$ 300 m	$a > 300$ m	$a \leq$ 300 m	$a > 300$ m
1	22	$22 \cdot [1 + 0,0006(a - 300)]$	0,30	$0,30 \cdot [1 + 0,0006(a - 300)]^2$
2	26	26	0,42	0,42
3	22	$22 \cdot [1 + 0,0006(a - 300)]$	0,30	$0,30 \cdot [1 + 0,0006(a - 300)]^2 \cdot \left[\frac{20000 - a}{20000 + a} \right]$

Średnia prędkość wiatru $v_m(z)$ na wysokości z nad poziomem terenu zależy od chropowatości i rzeźby terenu oraz od bazowej prędkości wiatru, v_b , i jest wyznaczana ze wzoru (Z1.3)

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (Z1.3)$$

gdzie:

$c_r(z)$ – współczynnik chropowatości, podany w tablicy Z1.2,
 $c_o(z)$ – współczynnik rzeźby terenu (orografii), $c_o(z) = 1,0$.

Wzory do obliczania współczynników chropowatości i ekspozycji zestawiono w tablicy Z1.2. Współczynnik chropowatości, $c_r(z)$, uwzględnia zmienność prędkości wiatru w miejscu lokalizacji konstrukcji w zależności od:

- wysokości nad poziomem gruntu,
- chropowatości terenu od strony rozpatrywanego kierunku wiatru.

Tablica Z1.2. Współczynnik chropowatości i współczynnik ekspozycji

Kategoria terenu	$c_r(z)$	$c_e(z)$
0	$1,27 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,11}$	$2,98 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,176}$
I	$1,18 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,13}$	$2,78 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,205}$
II	$\left(\frac{z}{10}\right)^{0,17}$	$2,29 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,265}$
III	$0,81 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,19}$	$1,89 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,26}$
IV	$0,62 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,24}$	$1,47 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,30}$

Wartość współczynnika chropowatości $c_r(z)$ określa się ze wzoru (Z1.4):

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (Z1.4)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad z < z_{\min}$$

gdzie: z_0 – wysokość chropowatości,

k_r – współczynnik terenu zależny od wysokości chropowatości z_0 , obliczony ze wzoru.

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (Z1.5)$$

gdzie: $z_{0,II} = 0,05$ m (kategoria terenu II, tablica Z1.3),

z_{\min} – wysokość minimalna, podana w tablicy Z1.3,

$z_{\max} = 200$ m,

z_0, z_{\min} zależą od kategorii terenu; wartości zalecane są podane w tablicy Z1.3

Intensywność turbulencji $I_v(z)$ na wysokości z jest zdefiniowana jako odchylenie standardowe składowych fluktuacyjnych prędkości wiatru, podzielone przez prędkość średnią wiatru, i wyznaczana na podstawie wyrażenia (Z1.6)

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_t}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)}, \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (Z1.6)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}), \quad z < z_{\min}$$

gdzie: k_t – współczynnik turbulencji; zalecana wartość $k_t = 1,0$,
 c_o – współczynnik rzeźby terenu,
 z_0 – wysokość chropowatości, podana w tabelicy Z1.3.

Tablica Z1.3. Kategorie i parametry terenu

Kategoria terenu		z_0 [m]	z_{min} [m]
0	Obszary morskie i przybrzeżne wystawione na otwarte morze	0,003	1
I	Jezióra lub tereny płaskie, poziome, o nieznacznej roślinności i bez przeszkód terenowych	0,01	1
II	Tereny o niskiej roślinności i o pojedynczych przeszkodach oddalonych od siebie na odległość równą co najmniej ich 20 wysokościom	0,05	2
III	Tereny regularnie pokryte roślinnością lub budynkami albo o pojedynczych przeszkodach, oddalonych od siebie najwyżej na odległość równą ich 20 wysokościom (takie jak wsie, tereny podmiejskie, stałe lasy)	0,3	5
IV	Tereny, których przynajmniej 15% powierzchni jest pokryte budynkami o średniej wysokości przekraczającej 15 m	1,0	10

Szczytowe ciśnienie prędkości $q_p(z)$ na wysokości z , które łączy wartość średnią i chwilowe fluktuacje prędkości, określa się ze wzoru:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (Z1.7)$$

+ lub ze wzoru

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (Z1.8)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza, zależna od wysokości nad poziomem morza, temperatury i ciśnienia atmosferycznego, występująca w rozważanym regionie w czasie silnego wiatru, wartość zalecana $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$,

$c_e(z)$ – współczynnik ekspozycji,

q_b – wartość bazowa ciśnienia prędkości wyrażona zależnością (Z1.9)

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (Z1.9)$$

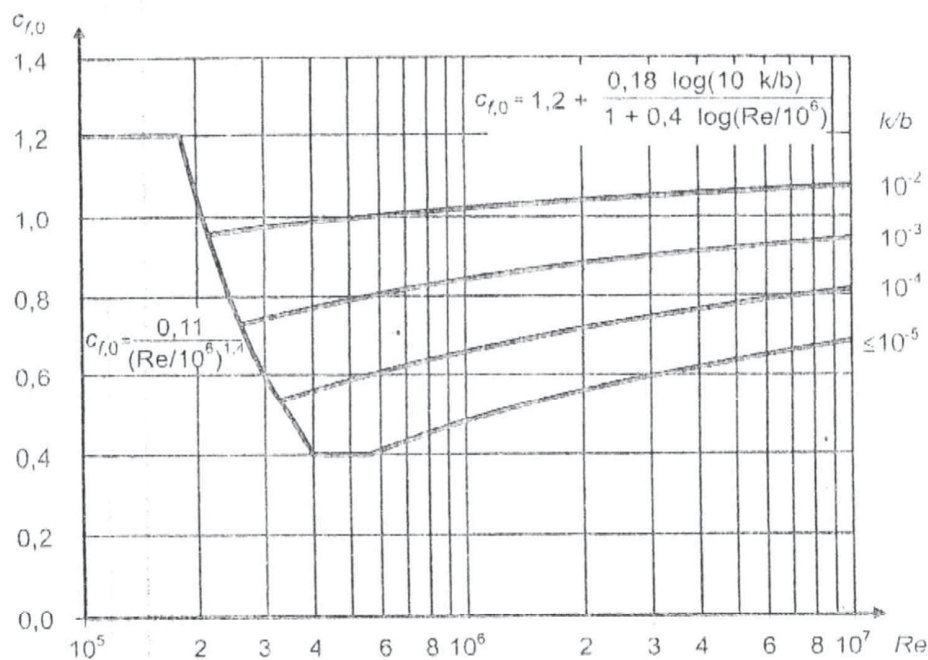
Z1.3. Współczynnik oporu aerodynamicznego

Współczynnik oporu aerodynamicznego c_f walca kołowego o skończonej długości wyznacza się ze wzoru (Z1.10):

$$c_f = c_{f0} \cdot \Psi_\lambda \quad (Z1.10)$$

gdzie: $c_{f,0}$ – współczynnik oporu aerodynamicznego walca bez wpływu swobodnego końca (rys. Z1.1),
 ψ_λ – współczynnik wpływu swobodnego końca.

z_0 [m]	z_{min} [m]
0,003	1
0,01	1
0,05	2
0,3	5
1,0	10



Rys. Z1.1. Współczynnik oporu aerodynamicznego $c_{f,0}$ walca kołowego bez wpływu swobodnych końców dla różnych wartości chropowatości względnej k/b

(Z1.7)

Liczbę Reynoldsa na rys. Z1.1 obliczono przy prędkości wiatru $v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}}$ dla

(Z1.8)

wartości q_p wyznaczonej ze wzoru (Z1.7) lub (Z1.8). Wartości chropowatości k są podane w tabelicy Z1.4.

em morza, temper-
 ozważanym regio-
 kg/m^3 ,

Tablica Z1.4. Wartości chropowatości powierzchni k

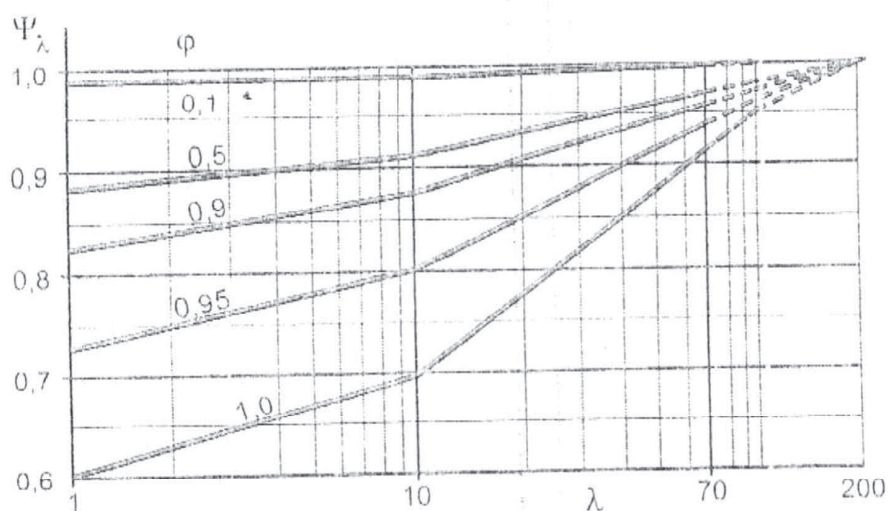
Rodzaj powierzchni	Chropowatość k	Rodzaj powierzchni	Chropowatość k
	[mm]		[mm]
Szkło	0,0015	beton gładki	0,2
Metal polerowany	0,002	drewno heblowane	0,5
Malowanie gładkie	0,006	beton surowy	1,0
Malowanie natryskowe	0,02	drewno piłowane	2,0
Stal polerowana	0,05	rdza	2,0
Żelazo lane	0,2	mur ceglany	3,0
Stal galwanizowana	0,2	–	–

(Z1.10)

Tablica Z1.5. Zalecane wartości λ dla walców

Położenie konstrukcji, kierunek wiatru normalny do płaszczyzny widocznej na tej stronie	Smukłość efektywna λ
	<p>Dla walców kołowych:</p> <ul style="list-style-type: none"> - dla $\ell \geq 50$ m, wymiar mniejszy z dwóch: $\lambda = 0,7 \ell/b$ albo $\lambda = 70$; - dla $\ell < 15$ m, wymiar mniejszy z dwóch: $\lambda = \ell/b$ albo $\lambda = 70$. <p>W przypadku pośrednich wartości ℓ należy stosować interpolację liniową.</p>

Smukłość efektywną λ należy wyznaczać w zależności od wymiarów konstrukcji i jej położenia. Zalecane wartości λ są podane w tablicy Z1.5, a orientacyjne wartości ψ_λ są podane na rys. Z1.2 dla różnych wartości współczynnika wypełnienia φ . W przypadku kominów współczynnik wypełnienia $\varphi = 1,0$.



Rys. Z1.2. Orientacyjne wartości współczynnika wpływu swobodnego końca ψ_λ w funkcji współczynnika wypełnienia φ i smukłości λ

Z1.4. Procedura wyznaczania współczynnika konstrukcyjnego $c_s c_d$ (według załącznika B normy PN-EN 1991-1-4)

Z1.4.1. Turbulencja wiatru

Do wysokości 200 m, liniowa skala turbulencji może być obliczana na podstawie zależności (Z1.11):

$$L(z) = L_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^\alpha \quad \text{jeżeli } z \geq z_{\min} \quad (\text{Z1.11})$$

$$L(z) = L(z_{\min}) \quad \text{jeżeli } z < z_{\min}$$

przy wysokości odniesienia $z_t = 200$ m, skali odniesienia $L_t = 300$ m i $\alpha = 0,6 + 0,05 \ln(z_0)$, gdzie wysokość chropowatości z_0 jest podana w m. Najniższa wysokość z_{\min} jest podana w tabelicy Z1.3.

Rozkład porywów wiatru w funkcji częstotliwości jest wyrażony za pomocą bezwymiarowej funkcji gęstości spektralnej mocy $S_L(z, n)$, którą należy wyznaczać na podstawie wyrażenia (Z1.12):

$$S_L(z, n) = \frac{n \cdot S_v(z, n)}{\sigma_v^2} = \frac{6,8 \cdot f_L(z, n)}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z, n))^{5/3}} \quad (\text{Z1.12})$$

gdzie $S_v(z, n)$ jednostronna gęstość spektralna (równa wariancji porywów wiatru) oraz

$$f_L(z, n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)} \quad \text{częstotliwość bezwymiarowa obliczana dla częstotliwości}$$

$n = n_{1,x}$, równej częstotliwości drgań własnych konstrukcji w Hz, średniej prędkości wiatru $v_m(z)$ i skali turbulencji $L(z)$ zdefiniowanej wyrażeniem (Z1.12).

Z1.4.2. Współczynnik konstrukcyjny

Współczynnik odpowiedzi pozarezonansowej (quasi-statycznej) B^2 uwzględnia brak pełnej korelacji ciśnienia na powierzchni konstrukcji; może być obliczany ze wzoru (Z1.13):

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} \quad (\text{Z1.13})$$

gdzie: b, h – szerokość i wysokość konstrukcji,
 $L(z_s)$ – skala turbulencji, podana w (Z1.11), na wysokości $z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{\min}$.

Współczynnik wartości szczytowej k_p , zdefiniowany jako stosunek wartości maksymalnej fluktuacyjnej części odpowiedzi do jej odchylenia standardowego, należy obliczać z zależności (Z1.14)

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \quad (\text{Z1.14})$$

albo przyjmować $k_p = 3$, jeżeli z obliczeń wynika wartość mniejsza, gdzie:

v – częstotliwość przewyższania,

T – czas uśredniania prędkości średniej wiatru, $T = 600$ s.

Częstotliwość przewyższania v oblicza się na podstawie wyrażenia (Z1.15):

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}}; \quad v \geq 0,02 \text{ Hz} \quad (\text{Z1.15})$$

gdzie $n_{1,x}$ – częstotliwość drgań własnych konstrukcji, którą można wyznaczać, stosując wzory podane w załączniku F. Wartość graniczna $v \geq 0,08$ Hz odpowiada współczynnikowi wartości szczytowej równemu 3,0.

Współczynnik odpowiedzi rezonansowej R^2 uwzględnia wpływ oddziaływania turbulentnego wiatru w rezonansie z rozpatrywaną postacią drgań konstrukcji; należy go wyznaczać, korzystając z wyrażenia (Z1.16):

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) \quad (\text{Z1.16})$$

gdzie: δ – całkowity logarytmiczny dekrement tłumienia wg p. F 5 załącznika F,

S_L – bezwymiarowa funkcja gęstości spektralnej mocy podana w (Z1.11),

R_h, R_b – funkcje admitancji aerodynamicznej.

Funkcje admitancji aerodynamicznej R_h i R_b dla podstawowej postaci drgań mogą być w przybliżeniu obliczone z zależności (Z1.17) i (Z1.18).

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}); \quad R_h = 1 \text{ dla } \eta_h = 0 \quad (\text{Z1.17})$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}); \quad R_b = 1 \text{ dla } \eta_b = 0 \quad (\text{Z1.18})$$

Przy $\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x})$ oraz $\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x})$

Współczynnik konstrukcyjny $c_s c_d$ jest obliczany na podstawie wzorów podanych w rozdziale 6 normy PN-EN 1991-1-4:

stosunek wartości standardowego,

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad (Z1.19)$$

(Z1.14)

gdzie: z_s – wysokość odniesienia do obliczania współczynnika konstrukcyjnego

W przypadku konstrukcji, do których rys. 6.1 normy nie ma zastosowania, z_s może być przyjęte jako równe wysokości konstrukcji h ,

k_p – współczynnik wartości szczytowej, określony jako stosunek maksymalnej wartości składowej fluktuacyjnej odpowiedzi konstrukcji do odchylenia standardowego tej składowej,

I_v – intensywność turbulencji,

B^2 – współczynnik odpowiedzi pozarezonansowej, uwzględniający brak pełnej korelacji ciśnienia na powierzchni konstrukcji,

R^2 – współczynnik odpowiedzi rezonansowej, uwzględniający oddziaływanie turbulentne wiatru w zakresie rezonansowym z drganiami konstrukcji.

ia (Z1.15):

(Z1.15)

na wyznaczać,

Hz odpowiada

oddziaływania

strukcji; należy

Współczynniki c_s i c_d mogą być określane oddzielnie.

Współczynnik rozmiarów c_s uwzględnia zmniejszenie oddziaływania wiatru w wyniku niejednoczesnego występowania wartości szczytowych ciśnienia na powierzchni konstrukcji i może być wyznaczony ze wzoru (Z1.20):

(Z1.16)

$$c_s = \frac{1 + 7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad (Z1.20)$$

łącznika F,

(Z1.11),

aci drgań mo-

Współczynnik dynamiczny c_d uwzględnia efekt wzmocnienia drgań konstrukcji wywołanych przez oddziaływanie turbulentne w rezonansie z drganiami konstrukcji i jest wyrażony wzorem (Z1.21).

(Z1.17)

Siła poprzeczna T_w wywierana przez wiatr na konstrukcję komina może być wyznaczana bezpośrednio z wyrażenia (Z1.22)

(Z1.18)

$$T_w = p_k \cdot A_{ref} \quad (Z1.22)$$

gdzie A_{ref} – pole powierzchni odniesienia.

Momenty zginające od wiatru M_w są obliczane na podstawie zależności

$$M_w = T_w \cdot z \quad (Z1.23)$$

wzorów poda-

gdzie z – ramię siły T_w .

mocy (szerokosci) przekroju kolna w plaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru jest większy niż 6. Rozpatrywanie wzbudzenia wirowego nie jest konieczne, jeżeli

$$v_{crit} > 1,25 \cdot v_m \quad (Z1.24)$$

lub

$$S_c > 25 \quad (Z1.25)$$

gdzie: v_{crit} – prędkość krytyczna,

S_c – liczba Scrutona, wyrażona wzorem:

$$S_c = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_e}{\rho \cdot b^2} \quad (Z1.26)$$

gdzie: δ_s – tłumienie konstrukcyjne,

ρ – gęstość powietrza w warunkach wzbudzenia wirowego, wartość zalecana: 1,25 kg/m³,

m_e – masa równoważna konstrukcji na jednostkę długości,

b – szerokość odniesienia przekroju poprzecznego, przy której zachodzi rezonansowe wzbudzenie wirowe.

Z2.1. W

W nin

przekroju

PN-EN 1

dowe no

wych we

Ustal

niarowa

– wpi

zeń i ma

– prz

1992-1-1

– wyi

Wedł

pr

ze wzglę

gdy odk

(skrócen

niczną ϵ .

tonu prz

ściskanie

graniczn

miny istn

Z2.2. W

Rozp

w jedno

normaln

obliczen

są (rys. 2

$R, r -$

$r_m = ($

$r_s -]$