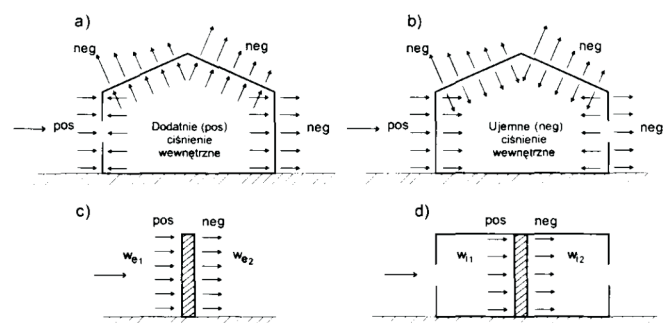


Obciążenie wiatrem budynków w ujęciu normy PN-EN 1991-1-4:2008

Przedstawiono ustalenia nowej normy „Oddziaływania wiatru” [3] dotyczące budynków. Podano postanowienia ogólne oraz szczegółowe w odniesieniu do rozkładu wartości współczynnika ciśnienia na ścianach i na połaciach dachowych. Wyznaczanie wartości obciążenia wiatrem pokazano na kilku przykładach.

Zasady ustalania obciążenia wiatrem budynków

Ustalając obciążenie wiatrem budynku rozróżnia się obciążenie przegród (np. ścian), oddzielnie ich powierzchni zewnętrznych i wewnętrznych (rys. 1), oraz obciążenie całkowite konstrukcji. Obowiązek uwzględnienia ciśnienia wewnętrznego nakłada punkt 5.1.(1)P normy.



Rys. 1. Obciążenie przegród budowli według [2]

Ciśnienie wiatru działające na powierzchni przegród oblicza się według wzorów (5.1) i (5.2) w normie [3], identycznych z podanymi poniżej, określającymi:

- obciążenie powierzchni zewnętrznych

$$w_e = q_p(z_e) c_{pe} \quad (1)$$

- obciążenie powierzchni wewnętrznych

$$w_i = q_p(z_i) c_{pi} \quad (2)$$

Sily wywierane przez wiatr na konstrukcję budynku jako całość należy obliczać, sumując wektorowo sily z powierzchni obciążonych ciśnieniem, stosując podane niżej wzory (3) i (4), odpowiadające w normie wzorom (5.5) i (5.6), wyróżniając obciążenie:

- zewnętrzne

$$F_{w,e} = c_s c_d \sum_{\text{powierzchnie}} w_e A_{ref} \quad (3)$$

- wewnętrzne

$$F_{w,i} = \sum_{\text{powierzchnie}} w_i A_{ref} \quad (4)$$

Jak wynika z wzorów (1) i (2), w obliczeniach obciążenia przegród, a także sił działających na powierzchni wewnętrzne – wzór (4) – przyjmuje się $c_s c_d = 1,0$.

W przypadku konstrukcji o powierzchniach zewnętrznych równoległych albo znajdujących się pod niewielkim kątem do kierunku wiatru, których łączne pole jest większe od 4-krotnej sumy wszystkich powierzchni zewnętrznych prostopadłych do kierunku wiatru (nawierzchnych i zawierzchnych) należy obliczać obciążenie siłami tarcia¹⁾, według wzoru

$$F_{fr} = c_{fr} q_p(z_e) A_{fr} \quad (5)$$

Wielkości występujące w podanych wyżej wzorach są omówione w normie [3] i w artykule [4].

Obliczając obciążenie przegród według wzorów (1) i (2), należy ustalić wysokości odniesienia z_e do obliczeń ciśnienia zewnętrznego i z_i do obliczeń ciśnienia wewnętrznego. Sposób ustalania wysokości odniesienia jest inny dla ściany nawierzchniej i ścian pozostałych. W przypadku nawierzchniej ściany budynku wartości z_e i z_i zależą od stosunku całkowitej wysokości budynku h do jego szerokości b , mierzonej prostopadłe do rozpatrywanego kierunku wiatru (rys. 7.4 w [3]). Są one przyjmowane jako górne wysokości poziomych pasów (obszarów), na które dzieli się ścianę nawierzchnią. W przypadku każdego obszaru przyjmuje się stałe wartości ciśnienia prędkości, obliczone na jego górnej krawędzi.

Rozróżnia się trzy przypadki, zależnie od stosunku h/b :

- ścianę nawierzchnią budynku, którego wysokość h jest mniejsza niż b , należy traktować jako jedno pole i przyjmować $z_e = h$,

- ścianę nawierzchnią budynku, którego wysokość h jest większa niż b , lecz mniejsza niż $2b$, można traktować jako składającą się z dwóch części: dolnej, rozciągającej się w górę od poziomu podstawy budynku do wysokości równej b , i z pozostałej części górnej; w przypadku części dolnej $z_e = b$, a części górnej $z_e = h$,

- ścianę nawierzchnią budynku, którego wysokość h jest większa niż $2b$, można traktować jako składającą się z kilku części, zawierających: część dolną, rozciągającą się w górę od poziomu podstawy budynku do wysokości równej b , część górną, rozciągającą się w dół od górnego krawędzi budynku na długość b , i obszar pośredni zawarty między częścią górną a dolną, który może być podzielony na poziome pasy o wysokości h_{strip} , jak pokazano na rys. 7.4 w [3]; w załączniku krajowym podano, że jeżeli wysokość budynku $h > 2b$, to wysokość pasa środkowego dzieli się na możliwie najmniejszą liczbę równych części o wysokości każdej z nich nie większej niż b .

W przypadku ściany tylnej i ścian bocznych sposób ustalania wysokości odniesienia może być podany w załączniku krajowym, ale w normie napisano, że zaleca się przyjmować $z_e = h$, niezależnie od stosunku h/b . To zalecenie przyjęto w Załączniku krajowym [3].

Współczynniki ciśnienia zewnętrznego c_{pe} budynków i ich części zależą od rozmiarów obciążonej powierzchni o polu

¹⁾ W trakcie opracowania redakcyjnego punktu 5.3 (4) normy [3] wkraśl się błąd. Postanowienie to powinno brzmieć tak jak w niniejszym artykule.

oznaczonym w normie symbolem A, z którego jest zbierane obciążenie wiatrem. Są one podane w tablicach w odniesieniu do dwóch pól: $A = 1 \text{ m}^2$ i $A = 10 \text{ m}^2$, odpowiednio jako współczynniki lokalne $c_{pe,1}$ i globalne $c_{pe,10}$. Zróżnicowanie to wynika z pulsacji ciśnienia; im mniejsze pole powierzchni, tym większe są chwilowe wartości ciśnienia.

Wartości $c_{pe,1}$ są przeznaczone do obliczeń łączników i małych elementów o polu powierzchni 1 m^2 lub mniejszej, takich jak elementy ścian ostonowych i dachów. Wartości $c_{pe,10}$ należy stosować w obliczeniach konstrukcji nośnych budynków jako całości.

Jeżeli $1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$, to

$$c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \log_{10} A. \quad (6)$$

Wartości współczynnika ciśnienia są podane w odniesieniu do pól wydzielonych na bocznych ścianach budynku oraz na dachu. W przypadku ścian bocznych są one zróżnicowane w zależności od stosunku h/d oraz ze względu na omówioną wyżej wielkość rozpatrywanej powierzchni. To zróżnicowanie dotyczy jednak tylko ściany nawietrznej oraz dwóch pól ścian bocznych A i B [symbol A we wzorze (6) oznacza ogólnie pole powierzchni, a nie jeden z obszarów, na które w normie zostały podzielone ściany boczne budynku oraz dachu. Na tych obszarach występują największe pulsacje ciśnienia; na ścianie zawietrznej są one znacznie mniejsze.

Całkowite obciążenie poziome budynku wyznacza się ze wzoru, w którym sumę obciążenia powierzchni zewnętrznych mnoży się przez współczynnik konstrukcyjny

$$F_w = c_s c_d \sum_{\text{powierzchnie zewnętrzne}} [c_{pe,10} q_p(z_e) A_{ref}]. \quad (7)$$

Sumowaniu podlegają obciążenia ściany nawietrznej z obszarów (pasów) określonych według rys. 7.4 normy i obciążenie ściany zawietrznej. Przyjmuje się wartości współczynnika $c_{pe,10}$, tzn. podane w odniesieniu do $A \geq 10 \text{ m}^2$.

W uwadze do p. 7.2.2 (3) podano, że brak korelacji między ciśnieniem wiatru po stronie nawietrznej i zawietrznej może być rozpatrzony w ten sposób, że w przypadku budynków o $h/d \geq 5$ siłą wypadkową mnoży się przez 1, natomiast w przypadku budynków o $h/d \leq 1$ siłą wypadkową mnoży się przez 0,85. Przy pośrednich wartościach h/d można stosować interpolację liniową.

W przypadku budynków smukłych, o $h/d \geq 5$, do wyznaczania całkowitego obciążenia poziomego można użyć współczynnika oporu aerodynamicznego pręta o przekroju prostokątnym (rys. 7.23 i wzór 7.9 w normie [3]). Wówczas obciążenie całkowite oblicza się ze wzoru normowego (5.3) mającego postać

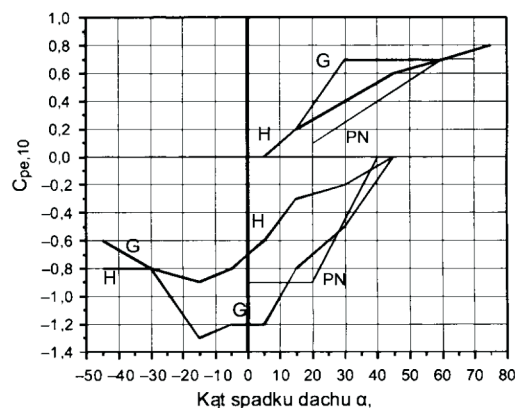
$$F_w = c_s c_d c_f q_p(z_e) A_{ref}, \quad (8)$$

a współczynnik c_f wyznacza zgodnie z procedurą podaną w p. 7.6 [3]. Wysokość odniesienia z_e można ustalać analogicznie do wyznaczania obciążenia ściany nawietrznej (rys. 7.4 [3]).

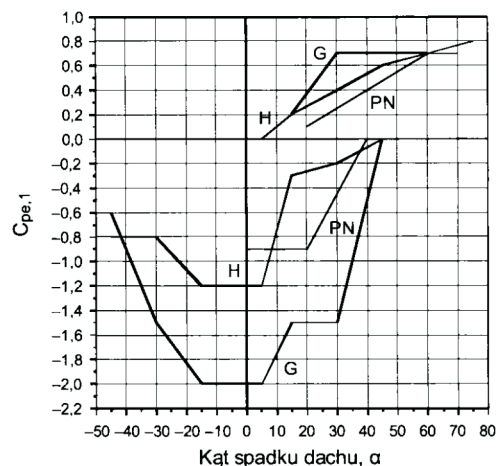
W przypadku konstrukcji o przekroju prostokątnym, podatnych na efekty skręcania, należy stosować rozkład ciśnienia pokazany w normie na rysunku 7.1. Obciążenie ściany nawietrznej zmniejsza się liniowo od pełnej wartości przy jednej krawędzi pionowej do zera przy drugiej. Obciążenie ściany zawietrznej, tylnej, pozostaje bez zmiany; obciążenia ścian bocznych nie bierze się pod uwagę. Taki rozkład ciśnienia dotyczy budynków w formie regularnego prostopadłościanu na rzucie prostokąta; w przypadku innych kształtów skręcanie będzie wynikać ze specyfiki kształtu.

Rozkład współczynnika ciśnienia zewnętrznego na dachach przedstawiono w rozdziale 7 normy [3]. Przykłady zależności współczynników $c_{pe,10}$ i $c_{pe,1}$ od kąta pochylenia (spadku) dachu

dwuspadowego przedstawiono na rys. 2 i 3. W celu porównania pokazano również odpowiednie zależności według dotychczasowej normy polskiej, jednak bez wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego dachów o kątach spadku $\alpha < 0$, bo takich tam nie ma. W normie polskiej [2] nie ma zróżnicowania współczynnika ciśnienia w zależności od wielkości rozpatrywanej powierzchni. Obszar G według [3] odpowiada w przybliżeniu obszarowi obciążenia krawędziowego o $C_z = -2,0$ [2].



Rys. 2. Zależność współczynnika ciśnienia zewnętrznego $c_{pe,10}$ od kąta spadku połaci nawietrznej (pola G i H dachu dwuspadowego) w Eurokodzie [3] i w normie polskiej [2]



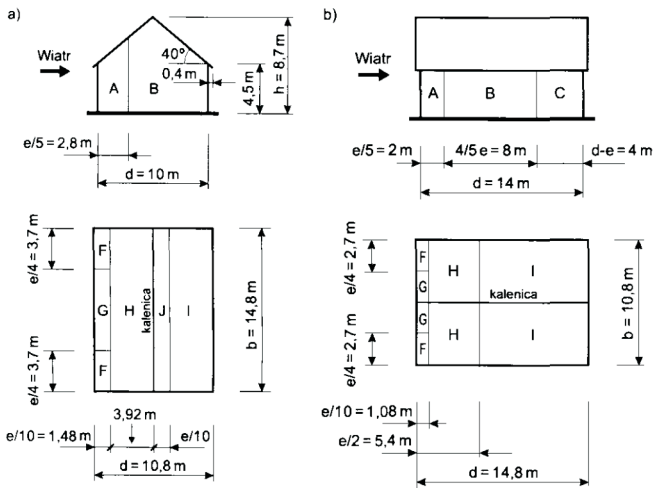
Rys. 3. Zależność współczynnika ciśnienia zewnętrznego $c_{pe,1}$ od kąta spadku połaci nawietrznej (pola G i H dachu dwuspadowego) w Eurokodzie [3] i w normie polskiej [2]

Tak jak dotychczas, w pewnych zakresach kąta spadku należy wykonywać obliczenia, przyjmując wartości $c_{pe} < 0$ i $c_{pe} > 0$. Zwracają uwagę mniejsze niż w normie polskiej, co do wartości bezwzględnej, wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego na przeważającej części połaci nawietrznej (pole H). Oznacza to mniejsze podciśnienie wywierane na dach (słabsze podrywanie dachu). Nadciśnienie natomiast, reprezentowane przez wartości $c_{pe,1} > 0$ i $c_{pe,10} > 0$, jest większe.

Przykłady obliczeń

Zamieszczono dwa przykłady. Pierwszy dotyczy typowego budynku niskiego z dachem dwuspadowym. Jako przykład drugi przedstawiono obliczenia obciążenia wiatrem budynku wysokiego, z uwzględnieniem współczynnika konstrukcyjnego. Wyniki obliczeń porównano z wynikami obliczeń według dotychczasowej normy polskiej. Podano wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem. W obliczeniach konstrukcyjnych należy uwzględnić częściowy współczynnik bezpieczeństwa (współczynnik obciążenia) i współczynnik kombinacyjny.

• **Przykład 1.** Budynek o rzucie 10×14 m, z dachem dwuspadowym o kącie spadku 40° , o wysokości ścian $4,5$ m i wysokości całkowitej $h = 8,7$ m. Dach z okapem sięgającym na $0,4$ m od ścian (rys. 4). Strefa 1 obciążenia wiatrem, $v_b = 22$ m/s, teren kategorii II, rolniczy, otwarty według [3], wysokość chropowatości $z_0 = 0,05$ m. Orientacja ścian dłuższych: wschód – zachód.



Rys. 4. Budynek z przykładu 1. Zaznaczono pola ścian i dachu według kierunku wiatru i normy (rys. 7.5 i 7.8 [3]). Na rysunkach górnych podział ścian, na dolnych podział dachu

Obciążenie wiatrem powierzchni zewnętrznych oblicza się ze wzoru (1), a obciążenie powierzchni wewnętrznych ze wzoru (2). Jeżeli przyjąć, że nie ma dominujących otworów w przegrodach zewnętrznych, to w obu przypadkach wysokość odniesienia jest taka sama, równa wysokości całkowitej budynku $z_e = z_i = h = 8,7$ m. Wartość szczytową ciśnienia prędkości można obliczyć według wzorów podanych w Eurokodzie [3] albo w Załączniku krajowym do niego. W pierwszym przypadku należy obliczyć najpierw intensywność turbulencji z wzoru (4.7) normy [3]

$$I_v(h) = \frac{1}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} = \frac{1}{\ln\left(\frac{8,7}{0,05}\right)} = 0,194. \quad (9)$$

Przyjęto $k_1 = 1,0$ i $c_0(z) = 1,0$.

Współczynnik chropowatości obliczono ze wzoru

$$c_r(h) = 0,19 \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) = 0,19 \ln\left(\frac{8,7}{0,05}\right) = 0,98, \quad (10)$$

zatem wartość szczytowa ciśnienia prędkości

$$q_p(h) = [1 + 7I_v(h)] \frac{1}{2} \rho [c_r(h)v_b]^2 = [1 + 7 \cdot 0,194] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot [0,98 \cdot 22]^2 = 685 \text{ N/m}^2. \quad (11)$$

$$q_p(8,7) = 0,685 \text{ kN/m}^2.$$

Postępując się wzorem potęgowym na współczynnik ekspozycji, podanym w Załączniku krajowym do Eurokodu [3], otrzymuje się

$$c_e(h) = 2,3 \left(\frac{h}{10}\right)^{0,24} = 2,3 \left(\frac{8,7}{10}\right)^{0,24} = 2,22 \quad (12)$$

oraz wartość szczytową ciśnienia prędkości na wysokości odniesienia $z_e = 8,7$ m

$$q_p(8,7) = 2,22 \cdot 0,3 = 0,666 \text{ kN/m}^2.$$

Wartości obciążenia, obliczane z wykorzystaniem współczynnika ekspozycji według Załącznika krajowego, są zatem mniejsze o około 3% od wartości obliczonych według oryginalnych wzorów Eurokodu. Dotyczy to tylko budynku wysokości $8,7$ m w terenie kategorii II. W innych przypadkach różnice będą inne [4].

W dalszych obliczeniach wykorzystano wartości szczytowe ciśnienia prędkości wyznaczone według Załącznika krajowego. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabl. 1÷4, oddzielnie w odniesieniu do ścian i dachu, przy dwóch kierunkach wiatru: prostopadłym i równoległym do kalenicy. Podział powierzchni zewnętrznych ścian budynku, zgodnie z rys. 7.5 normy i dachu dwuspadowego według rys. 7.8, pokazano na rys. 4. Zgodnie z p. 7.2.5 przy podziale dachu na obszary o zróżnicowanym ciśnieniu należy brać pod uwagę wymiary dachu z okapem. Mogą one zatem nieco różnić się od podziału ścian. Wartości współczynników ciśnienia zewnętrznego i wewnętrznego wzięto z tablic 7.1 i 7.4a [3]. Podano skrajne wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego i obciążenia powierzchni zewnętrznych – w przypadku elementów o powierzchni 1 m^2 i 10 m^2 . W projektowaniu konstrukcji należy je zróżnicować, zgodnie z wzorem (6), w zależności od wielkości pola powierzchni, z którego jest zbierane obciążenie przypadające na obliczany element. Wartości współczynnika ciśnienia wewnętrznego, a więc także obciążenia powierzchni wewnętrznych, nie zależą od rozmiarów rozpatrywanych elementów, są takie same

Tablica 1

Przykład 1. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku. Kierunek wiatru 0° , $c_{dir} = 1,0$; $h/d = 0,87$

Wielkość	Pola ścian			
	A	B	D	E
$C_{pe,10}$	-1,2	-0,8	0,783	-0,465
$C_{pe,1}$	-1,4	-1,1	1,0	
Obciążenie według PN-EN 1991-1-4:2008				
$W_{e,10}$	-0,799	-0,533	0,521	-0,310
$W_{e,1}$	-0,932	-0,733	0,666	
$W_i (C_{pi} = 0,2)$	0,133			0,133
$W_i (C_{pi} = -0,3)$	-			-
$W_{net,10}$	-0,932	-0,666	0,721	-0,443
$W_{net,1}$	-1,065	-0,866	0,866	
Obciążenie według PN-B-02011:1977				
C_z	-0,7	-0,7	0,7	-0,4
$\rho_k (\beta = 1,8)$	-0,315	-0,315	0,315	-0,180
$\rho_k (\beta = 2,2)$	-0,385	-0,385	0,385	-0,220

Wartości obciążenia netto przedstawiają sumę algebraiczną obciążenia z dwóch stron tej samej przegrody.

Tablica 2

Przykład 1. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku. Kierunek wiatru 90° , $q_p(8,7) = 0,330 \text{ kN/m}^2$, $c_{dir} = 0,7$, $h/d = 0,621$

Wielkość	Pola ścian				
	A	B	C	D	E
$C_{pe,10}$	-1,2	-0,8	-0,5	0,75	-0,4
$C_{pe,1}$	-1,4	-1,1		1,0	
Obciążenie według PN-EN 1991-1-4:2008					
$W_{e,10}$	-0,396	-0,264	-0,165	0,248	-0,132
$W_{e,1}$	-0,462	-0,363		0,330	
$W_i (C_{pi} = 0,2)$	0,066			-	0,066
$W_i (C_{pi} = -0,3)$	-			-0,099	-
$W_{net,10}$	-0,462	-0,330	-0,231	0,347	-0,198
$W_{net,1}$	-0,528	-0,429		0,429	

Tabela 3

Przykład 1. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem dachu budynku. Kierunek wiatru 0°; $c_{dir} = 1,0$

Wielkość	Pole dachu				
	F	G	H	I	J
$C_{pe,10}$	-0,167	-0,167	-0,067	-0,267	-0,367
	0,70	0,70	0,533	0	0
$C_{pe,1}$	-0,50	-0,50	-0,067	-0,267	-0,367
	0,70	0,70	0,533	0	0
Obciążenie według PN-EN 1991-1-4:2008					
$W_{e,10}$	-0,111	-0,111	-0,045	-0,178	-0,244
	0,466	0,466	0,355	0	0
$W_{e,1}$	-0,333	-0,333	-0,045	-0,178	-0,244
	0,466	0,466	0,355	0	0
$W_i (C_{pi} = 0,2)$	0,133				
$W_i (C_{pi} = -0,3)$	-0,200				
$W_{net,10}$	-0,244	-0,244	-0,178	-0,311	-0,377
	0,089	0,089	0,155	0,022	-0,044
	0,333	0,333	0,222	-0,133	-0,133
	0,666	0,666	0,555	0,200	0,200
$W_{net,1}$	-0,466	-0,466	-0,178	-0,311	-0,377
	-0,133	-0,133	0,155	0,022	-0,044
	0,333	0,333	0,222	-0,133	-0,133
	0,666	0,666	0,555	0,200	0,200
Czcionką pogrubioną zaznaczono maksymalne wartości parcia wiatru i maksymalne wartości ssania wiatru. Dodatkowo należy uwzględnić obciążenie występujące na dolnej powierzchni okapu, zgodnie z punktem 7.2.1(3) normy [3].					
Obciążenie według PN-B-02011:1977					
C_z	0	0	0	-0,4	-0,4
	0,4	0,4	0,4	-0,4	-0,4
$\rho_k (\beta = 1,8)$	0			-0,18	
	0,18			-0,18	
$\rho_k (\beta = 2,2)$	0			-0,22	
	0,22			-0,22	

Tabela 4

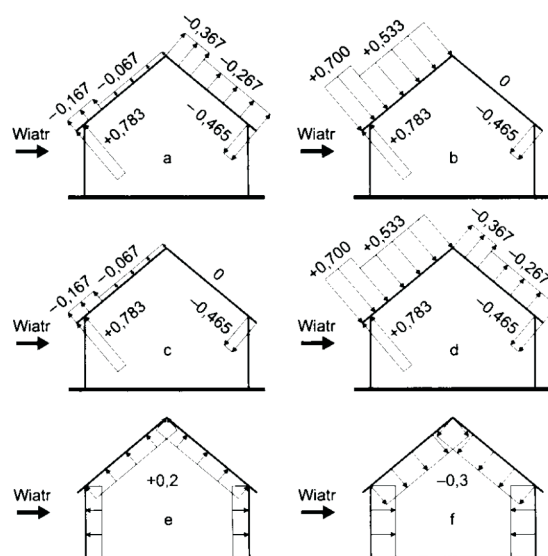
Przykład 1. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem dachu budynku. Kierunek wiatru 90°; $c_{dir} = 0,7$

Wielkość	Pole dachu			
	F	G	H	I
$C_{pe,10}$	-1,1	-1,4	-0,867	-0,5
$C_{pe,1}$	-1,5	-2,0	-1,2	-0,5
Obciążenie według PN-EN 1991-1-4:2008				
$W_{e,10}$	-0,363	-0,462	-0,286	-0,165
$W_{e,1}$	-0,495	-0,660	-0,396	-0,165
$W_i (C_{pi} = 0,2)$	0,066			
$W_{net,10}$	-0,429	-0,528	-0,352	-0,231
$W_{net,1}$	-0,561	-0,726	-0,462	-0,231

w przypadku całej przestrzeni wewnątrz budynku. Należy je jednak różnicować w zależności od kierunku działania sił zewnętrznych, tak aby z sumy algebraicznej obciążeń powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej uzyskiwać najniekorzystniejszy wynik. Ustalając obciążenie okapu, należy wziąć pod uwagę ciśnienie wywierane od spodu, zgodnie z rys. 7.3 w [3]. W tabelach 3 i 4 nie podano tego obciążenia ze względu na ich układ. Jest ono pokazane na rys. 5.

Pola oznaczone literą *F* są obciążone tylko przy pewnych kierunkach wiatru, na naroże. Podane w odniesieniu do nich wartości obciążenia nie występują jednocześnie na obu narożnikach dachu.

Oznaczenia wymiarów *b* i *d* rzutu budynku zależą od kierunku wiatru. Wymiar budynku prostopadły do kierunku wiatru jest



Rys. 5. Budynek z przykładu 1. Cztery przypadki (a, b, c, d) rozkładu współczynnika ciśnienia zewnętrznego $C_{pe,10}$ na połaciach dachowych i pod okapem, przy wietrze działającym na ścianę podłużną, oraz dwa przypadki (e, f) przyjęcia współczynnika ciśnienia wewnętrznego C_{pi} (zgodnie z uwagą 2 w punkcie 7.2.9 (6) normy [3])

oznaczony przez *b* (ang. breath – szerokość), a wymiar równoległy przez *d* (ang. depth – głębokość). Należy o tym pamiętać, rozpatrując stosunek *h/d* oraz ustalając wysokość odniesienia. W rozpatrywanym przykładzie, w przypadku wiatru prostopadłego do kalenicy $b = 14$ m, a przypadku wiatru równoległego $b = 10$ m.

Kierunek wiatru $\theta = 0^\circ$ według tablicy 7.4a normy [3] oznacza w rozpatrywanym przykładzie kierunek zachodni – wiatr z sektora 10, prostopadły do kalenicy (rys. 4a), natomiast kierunek wiatru $\theta = 90^\circ$ oznacza wiatr południowy, z sektora 7 (rys. 4b). Przywołano tu te kierunki, ponieważ umożliwia to wybór współczynnika kierunkowego. W przypadku sektora 10 $c_{dir} = 1,0$ natomiast sektora 7 $c_{dir} = 0,7$ [3].

Przy określaniu ciśnienia wewnętrznego wykorzystano uwagę 2 zamieszczoną w punkcie 7.2.9 (6) normy [3].

W przypadku wiatru prostopadłego do kalenicy (por. tabl. 3) przyjęto możliwość wystąpienia na poddaszu nadciśnienia ($C_{pi} = 0,2$) lub podciśnienia ($C_{pi} = -0,3$) w zależności od tego, która wartość jest bardziej niekorzystna w rozważanym wariancie rozkładu ciśnienia zewnętrznego na połaciach dachowych.

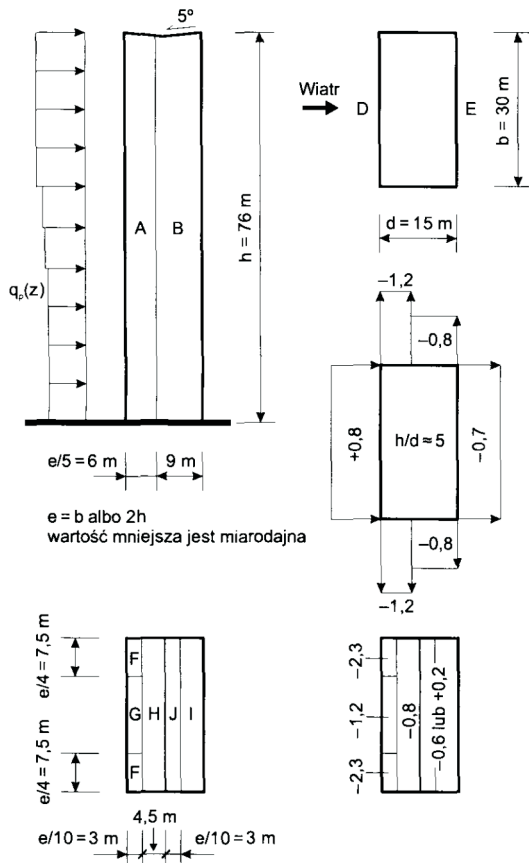
W przypadku wiatru równoległego do kalenicy (por. tabl. 4) przyjęto nadciśnienie na poddaszu ($C_{pi} = 0,2$) jako przypadek niekorzystny, bo sumujący się z podciśnieniem na powierzchniach zewnętrznych. Taka sytuacja może wystąpić, jeżeli duża jest przewiewność nawietrznej, szczytowej ściany poddasza.

W tablicach 1 i 3 podano także wyniki obliczeń według dotychczasowej normy, z uwzględnieniem dwóch wartości współczynnika działania porywów wiatru: $\beta = 1,8$ jak w przypadku budynków niepodatnych na dynamiczne działanie wiatru i $\beta = 2,2$ jak w przypadku małych elementów. Według tej normy nie rozpatruje się obciążenia wiatrem o kierunku równoległym do kalenicy, nie ma więc wyników takich obliczeń w wymienionych tablicach.

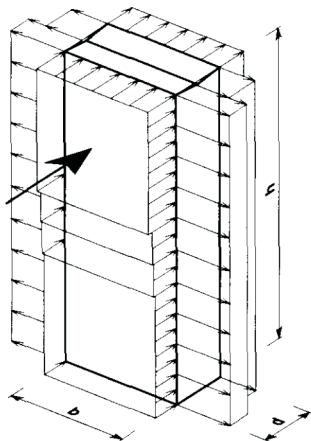
Wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem rozpatrywanego budynku, wyznaczone według nowej normy, są ponad dwukrotnie większe od wartości obliczonych według normy dotychczasowej. Wynika to z kilku przyczyn: ze zwiększenia wartości charakterystycznej prędkości wiatru, ze zmiany metody obliczeń, tj. z przyjęcia wartości szczytowej ciśnienia prędkości

jako ciśnienia odniesienia oraz z większych bezwzględnych wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego i z uwzględnienia ciśnienia wewnętrznego.

• **Przykład 2.** Budynek wysoki, o konstrukcji betonowej monolitycznej. Wysokość $h = 76,0$ m, wymiary rzutu $30,0 \times 15,0$ m (rys. 6, 7).



Rys. 6. Budynek z przykładu 2. Profil wartości szczytowych ciśnienia prędkości wiatru oraz rozkład wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego $c_{pe,10}$



Rys. 7. Budynek z przykładu 2. Rozkład obciążenia wiatrem ścian

Obliczenia wykonano według dwóch norm: nowej [3] oraz dotychczasowej [2], w przypadku kierunku wiatru zachodniego, prostopadłego do dłuższej osi budynku. Najpierw w tabl. 5, 6 i 7 podano obliczenia współczynnika konstrukcyjnego według obu procedur (1 i 2) Eurokodu. W tablicy 8 podano obliczenia współczynnika działania porywów wiatru według do-

Tablica 5

Przykład 2. Obliczenia wielkości wspólnych w obu procedurach wyznaczania współczynnika konstrukcyjnego

Wzór lub punkt normy	Wielkości obliczane
Częstotliwość i okres drgań własnych	
(F.2)	$n_1 = \frac{46}{76} = 0,61 \text{ Hz}, T_1 = 1/0,61 = 1,64 \text{ s}$
Wysokość odniesienia do obliczeń współczynnika konstrukcyjnego	
6.3. 2(P)	$z_s = 0,6 \cdot 76 = 45,6 \text{ m}$
Linowa skala turbulencji	
(B.1)	$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(1,0) = 0,67$ $L(45,6) = 300 \left(\frac{45,6}{200} \right)^{0,67} = 111,4 \text{ m}$
Współczynnik terenu	
(4.5)	$k_r = 0,19 \left(\frac{10}{0,05} \right)^{0,07} = 0,234$
Współczynnik chropowatości	
(4.4)	$c_r(45,6) = 0,234 \ln \left(\frac{45,6}{1,0} \right) = 0,894$
Prędkość średnia	
(4.3)	$v_m(45,6) = 22 \cdot 0,894 = 19,7 \text{ m/s}$
Częstotliwość bezwymiarowa	
(B.2)	$f_L(45,6) = \frac{0,61 \cdot 111,4}{19,7} = 3,45$
Bezwymiarowa funkcja gęstości spektralnej mocy	
(B.2)	$S_L(z_s, n) = \frac{6,8 \cdot 3,45}{(1 + 10,2 \cdot 3,45)^{5/3}} = 0,059$
Intensywność turbulencji	
(4.7)	$I_v(z_s) = \frac{1}{\ln \left(\frac{z_s}{z_0} \right)} = \frac{1}{\ln \left(\frac{45,6}{1,0} \right)} = 0,262$, przyjęto $c_0(z_s) = 1,0$.

tychczasowej normy. Podstawowe dane początkowe zamieszczono w tekście.

W przykładzie 2, w obliczeniach współczynnika konstrukcyjnego posłużono się wzorem logarymicznym Eurokodu, natomiast w pozostałych obliczeniach wykorzystano dwa profile prędkości: logarymiczny i potęgowy.

W obliczeniach według PN-EN 1991-1-4:2008 [3] przyjęto: strefa obciążenia wiatrem 1, $v_b = 22$ m/s. Teren kategorii IV (miejski), $z_0 = 1,0$ m. Logarymiczny dekrement tłumienia monolitycznych budynków betonowych $\delta = 0,10$.

W przypadku budynków wykonujących drgania o równomiernych przemieszczeniach poziomych i liniowej zmienności przemieszczeń w funkcji wysokości jest $\phi(y, z) = z/h$, $G_y = 1/2$, $G_z = 3/8$, $K_y = 1$ oraz $K_z = 3/2$. Obie stałe spadku c_1 i c_2 są równe 11,5.

W wyniku obliczeń według obu procedur otrzymano podobne wartości współczynnika konstrukcyjnego (0,815 i 0,810). Nie jest to jednak regułą; w zależności od strefy obciążenia wiatrem, kategorii terenu i rozmiarów budynku może wystąpić kilkuprocentowa różnica (w normie podano, że nie przekraczająca około 5%). W rozpatrywanym przykładzie korelacja obciążenia na ścianie nawietrznej jest w przypadku stosowania procedury 1 nieco większa – $c_s = 0,826$ zamiast 0,796 w obliczeniach według procedury 2, współczynnik dynamiczny zaś nieco mniejszy – $c_d = 0,987$ zamiast 1,02. Większe wartości współczynnika konstrukcyjnego otrzymuje się, przyjmując w obliczeniach współczynnik odpowiedzi pozarezonansowej $B^2 = 1$.

W obliczeniach według PN-77/B-02011 [2] przyjęto: strefa obciążenia wiatrem I, $V_k = 20$ m/s, teren C (miejski). Loga-

Tablica 6
Przykład 2. Obliczenia współczynnika konstrukcyjnego według procedury 1

Wzór lub punkt normy	Wielkości obliczane
Współczynnik odpowiedzi pozarezonansowej	
(B.3)	$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{30 + 76}{111,4}\right)^{0,63}} = 0,534$
Funkcje admittancji aerodynamicznej	
(B.7)	$\eta_h = \frac{4,6 \cdot 76}{111,4} \cdot 3,45 = 10,83$
(B.7)	$R_h = \frac{1}{10,83} - \frac{1}{2 \cdot 10,83^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 10,83}) = 0,088$
(B.8)	$\eta_b = \frac{4,6 \cdot 30}{111,4} \cdot 3,45 = 4,27$
(B.8)	$R_b = \frac{1}{4,27} - \frac{1}{2 \cdot 4,27^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 4,27}) = 0,207$
Współczynnik odpowiedzi rezonansowej	
(B.6)	$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,1} \cdot 0,059 \cdot 0,088 \cdot 0,207 = 0,053$
Częstotliwość przewyższania	
(B.5)	$\nu = 0,61 \sqrt{\frac{0,053}{0,534 + 0,053}} = 0,183$
Współczynnik wartości szczytowej	
(B.4)	$k_p = \sqrt{2 \ln(0,183 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(0,183 \cdot 600)}} = 3,26$
Współczynnik konstrukcyjny	
(6.1)	$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot 3,26 \cdot 0,262 \sqrt{0,534 + 0,053}}{1 + 7 \cdot 0,262} = \frac{1 + 1,309}{1 + 1,834} = 0,815$
Współczynnik rozmiarów	
(6.2)	$c_s = \frac{1 + 7 \cdot 0,262 \sqrt{0,534}}{1 + 7 \cdot 0,262} = \frac{1 + 1,340}{1 + 1,834} = 0,826$
Współczynnik dynamiczny	
(6.3)	$c_d = \frac{1 + 2k_p \nu(z_e) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \nu(z_e) \sqrt{B^2}} = \frac{1 + 2 \cdot 3,26 \cdot 0,262 \sqrt{0,534 + 0,053}}{1 + 7 \cdot 0,262 \sqrt{0,534}} = \frac{1 + 1,309}{1 + 1,340} = 0,987$

rytmiczny dekrement tłumienia monolitycznych budynków betonowych $\delta = 0,15$.

W tablicach 9 ÷ 13 zestawiono obciążenia poziome budynku, w odniesieniu do którego obliczono wartości współczynnika konstrukcyjnego według procedury 1.

Sumaryczne wartości obciążenia poziomego na konstrukcję nośną budynku obliczono według wzoru

$$w(z_e) = c_s c_d q_p(z_e) [c_{pe}(D) - c_{pe}(E)] = 0,815 q_p(z_e) [0,8 + 0,7] = 1,22 q_p(z_e). \quad (13)$$

Obliczenia według załącznika krajowego wykonano według wzoru

$$w(z_e) = c_s c_d q_b c_e(z_e) [c_{pe}(D) - c_{pe}(E)] = 0,815 \cdot 0,3 c_e(z_e) [0,8 + 0,7] = 0,367 c_e(z_e). \quad (14)$$

Obliczenia według PN-B-02011:1977 wykonano według wzoru

$$p_k(z_e) = q_k C_e(z_e) [C_z(D) - C_z(E)] \beta = 0,25 C_e(z_e) [0,8 + 0,8] 2,22 = 0,89 C_e(z_e). \quad (15)$$

W tablicy 14 zestawiono wartości obciążenia dachu, obliczone według wzoru

Tablica 7
Przykład 2. Obliczenia współczynnika konstrukcyjnego według procedury 2

Wzór lub punkt normy	Wielkości obliczane
Współczynnik odpowiedzi pozarezonansowej	
(C.1)	$B^2 = \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \sqrt{\left(\frac{30}{111,4}\right)^2 + \left(\frac{76}{111,4}\right)^2 + \left(\frac{30}{111,4} \cdot \frac{76}{111,4}\right)^2}} = 0,469$
Współczynnik redukcyjny ze względu na rozmiary	
(C.3)	$\phi_y = \frac{c_y b n}{v_m(z_s)} = \frac{11,5 \cdot 30 \cdot 0,61}{19,7} = 10,68$
(C.3)	$\phi_z = \frac{c_z h n}{v_m(z_s)} = \frac{11,5 \cdot 76 \cdot 0,61}{19,7} = 27,06$
(C.3)	$K_s(n) = \frac{1}{1 + \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right) 0,68^2 + \left(\frac{3}{8}\right) 27,06^2 + \left(\frac{2}{\pi}\right) \left(\frac{1}{2}\right) 0,68 \left(\frac{3}{8}\right) 27,06}} = 0,0268$
Współczynnik odpowiedzi rezonansowej	
(C.2)	$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,1} \cdot 0,059 \cdot 0,0268 = 0,078$
Częstotliwość przewyższania	
(B.5)	$\nu = 0,61 \sqrt{\frac{0,078}{0,469 + 0,078}} = 0,23$
Współczynnik wartości szczytowej	
(B.4)	$k_p = \sqrt{2 \ln(0,23 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(0,23 \cdot 600)}} = 3,33$
Współczynnik konstrukcyjny	
(6.1)	$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot 3,33 \cdot 0,262 \sqrt{0,469 + 0,078}}{1 + 7 \cdot 0,262} = 0,81$
Współczynnik rozmiarów	
(6.2)	$c_s = \frac{1 + 7 \cdot 0,262 \sqrt{0,469}}{1 + 7 \cdot 0,262} = 0,796$
Współczynnik dynamiczny	
(6.3)	$c_d = \frac{1 + 2 \cdot 3,33 \cdot 0,262 \sqrt{0,469 + 0,078}}{1 + 7 \cdot 0,262 \sqrt{0,469}} = 1,02$

$$w_{net} = q_p(z_e) [c_{pe} - c_{pi}] = 0,815 [c_{pe} - c_{pi}]. \quad (16)$$

Wartość $q_p(z_e) = 0,815 \text{ kN/m}^2$ obliczona dla $z_e = 76 \text{ m}$ jest przypadkowo taka sama liczbowo jak wartość $c_s c_d = 0,815$ (tabl. 6).

Zakładając, że poddasze wentylowane jest jednoprzestrzenne, a otwory wentylacyjne są równomierne rozłożone we wszystkich czterech ścianach, przyjmuje się $c_{pi} = -0,3$, bo dominujące jest podciśnienie (podciśnienie zewnętrzne działa na trzy ściany, a nadciśnienie na jedną – nawietrzną).

Uwagi końcowe

W artykule przedstawiono sposób wyznaczania obciążenia wiatrem budynków według nowej normy polskiej. Na dwóch przykładach, typowego budynku niskiego i budynku wysokiego, przedstawiono procedury obliczeniowe. W przypadku budynku niskiego posłużono się potęgowym profilem ciśnienia prędkości według Załącznika krajowego, a w przypadku budynku wysokiego wykorzystano obydwaj podejścia: profil logarytmiczny według oryginalnego Eurokodu i profil potęgowy według Załącznika krajowego. Rezultaty obliczeń porównano z wynikami obliczeń według dotychczasowej normy polskiej. Z obliczeń wynikają dwa oczywiste, niższe podane wnioski.

Tablica 8

Przykład 2. Obliczenia współczynnika działania porywów wiatru według PN-B-02011:1977

Wzór lub punkt normy	Wielkości obliczane
Okres i częstotliwość drgań własnych	
Z2-1 Lp.1	$T_1 = 0,015 \cdot 76 = 1,14$ s; $n_1 = 1/1,14 = 0,88$ Hz
Współczynnik ekspozycji	
Tablica 4	$C_e = 0,5 + 0,007 \cdot 76 = 1,03$
Współczynnik wartości szczytowej	
Rys. 5	$k_p = \sqrt{2 \ln(0,88 \cdot 600)} + \frac{0,577}{\sqrt{2 \ln(0,88 \cdot 600)}} = 3,70$
Współczynnik oddziaływania turbulentnego o częstościach pozarezonansowych	
Rys. 6	$\xi = \frac{30}{76} = 0,395$; $A = -\frac{0,042}{28,8 \cdot 0,395 + 1} = -0,0034$
	$B = -\frac{0,395}{2,65 \cdot 0,395 + 0,24} = -0,307$
	$C = 2,29 - 0,12 \cdot 0,395 + \frac{0,395 - 1,29}{24,5 \cdot 0,395 + 3,48} = 2,175$
	$k_b = -0,0034 \cdot (\ln 76)^2 - 0,307 \cdot \ln 76 + 2,175 = 0,782$
Współczynnik oddziaływania turbulentnego o częstościach rezonansowych	
Rys. 7	$V_H = 20 \sqrt{1,03} = 20,3$ m/s
	$K_L = \frac{\pi}{3} \left[\frac{1}{1 + \frac{8 \cdot 0,88 \cdot 76}{3 \cdot 20,3}} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{10 \cdot 0,88 \cdot 30}{20,3}} \right] = 0,00764$
	$x = \frac{1200 \cdot 0,88}{20,3} = 52,02$
	$K_0 = \frac{52,02^2}{(1 + 52,02^2)^{3/4}} = 0,0717$
(6)	$k_r = \frac{2\pi \cdot 0,00764 \cdot 0,0717}{0,15} = 0,0229$
(5)	$\beta = 1 + 3,7 \sqrt{\frac{0,14}{1,03} \cdot (0,782 + 0,0229)} = 2,22$

Tablica 9

Przykład 2. Zestawienie wartości obciążenia wiatrem budynku $h = 76$ m. Kierunek wiatru prostopadły do ściany $b = 30$ m. Współczynnik konstrukcyjny obliczony według procedury 1. Wartości $q_p(z_e)$ według Eurokodu

z_e m	$c_s(z_e)$	$v_m(z_e)$ m/s	$I_s(z_e)$	$q_p(z_e)$ N/m ²	C_{pe} (A)	C_{pe} (B)	C_{pe} (D)	C_{pe} (E)	$C_s C_d$	W N/m ²	W kN/m ²
76	1,015	22,3	0,231	815	-1,2	-0,8	+0,8	-0,7	0,815	994	0,99
46	0,897	19,7	0,261	689						841	0,84
38	0,852	18,8	0,275	643						784	0,78
30	0,797	17,5	0,294	588						717	0,72

Tablica 10

Przykład 2. Zestawienie wartości obciążenia wiatrem budynku $h = 76$ m. Kierunek wiatru prostopadły do ściany $b = 30$ m. Współczynnik konstrukcyjny obliczony według procedury 1. Wartości $q_p(z_e)$ według Załącznika krajowego do Eurokodu

z_e m	$c_s(z_e)$	q_b kN/m ²	$q_p(z_e)$ kN/m ²	C_{pe} (A)	C_{pe} (B)	C_{pe} (D)	C_{pe} (E)	$C_s C_d$	W kN/m ²
76	2,701	0,3	0,810	-1,2	-0,8	+0,8	-0,7	0,815	0,99
46	2,335		0,701						0,86
38	2,209		0,663						0,81
30	2,063		0,619						0,76

Tablica 11

Przykład 2. Zestawienie wartości obciążenia wiatrem ścian budynku $h = 76$ m. Kierunek wiatru prostopadły do ściany $b = 30$ m. Współczynniki ciśnienia w przypadku pól $A \geq 10$ m²

z_e m	$q_p(z_e)$ N/m ²	$C_{pe,10}$ (A)	$C_{pe,10}$ (B)	$C_{pe,10}$ (D)	$C_{pe,10}$ (E)	w (A) kN/m ²	w (B) kN/m ²	w (D) kN/m ²	w (E) kN/m ²
76	815	-1,2	-0,8	+0,8	-0,7	-0,98	-0,65	+0,65	-0,57
46	689							+0,55	
38	643							+0,51	
30	588							+0,47	

Tablica 12

Przykład 2. Zestawienie wartości obciążenia wiatrem ścian budynku $h = 76$ m. Kierunek wiatru prostopadły do ściany $b = 30$ m. Współczynniki ciśnienia w przypadku pól $A \leq 1$ m²

z_e m	$q_p(z_e)$ N/m ²	$C_{pe,10}$ (A)	$C_{pe,10}$ (B)	$C_{pe,10}$ (D)	$C_{pe,10}$ (E)	w (A) kN/m ²	w (B) kN/m ²	w (D) kN/m ²	w (E) kN/m ²
76	815	-1,4	-1,1	+1,0	-0,7	-1,14	-0,90	+0,81	-0,57
46	689							+0,69	
38	643							+0,64	
30	588							+0,59	

Tablica 13

Przykład 2. Zestawienie wartości obciążenia wiatrem budynku $h = 76$ m. Obliczenia według PN-B-02011:1977

z m	z_e	$C_e(z_e)$	C_{pe} (A)	C_{pe} (B)	C_{pe} (D)	C_{pe} (E)	β	p_k kN/m ²
70 ÷ 76	73	1,011	-1,0	-1,0	+0,8	-0,8	2,22	0,90
60 ÷ 70	65	0,955						0,85
50 ÷ 60	55	0,885						0,79
40 ÷ 50	45	0,815						0,73
30 ÷ 40	35	0,745						0,66
≤ 30	30	0,7						0,62

Tablica 14

Przykład 2. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem dachu budynku. Kierunek wiatru 0°; $h/d = 5,087$

Wielkość	Pola dachu						
	F	G	H	I	J		
$C_{pe,10}$	-2,3	-1,2	-0,8	+0,2	-0,6	+0,2	-0,6
$C_{pe,1}$	-2,5	-2,0	-1,2				
Obciążenie według PN-EN 1991-1-4							
$w_{e,10}$	-1,87	-0,98	-0,65	+0,16	-0,49	+0,16	-0,49
$w_{e,1}$	-2,04	-1,63	-0,98				
w_i ($C_{pi} = -0,3$)	-0,24						
$w_{net,10}$	-1,63	-0,74	-0,41	+0,40	-0,25	+0,40	-0,25
$w_{net,1}$	-1,80	-1,39	-0,74				
Obciążenie według PN-B-02011:1977							
C_z	-0,9	-0,9	-0,9	-0,4	-0,4		
p_k ($\beta = 1,8$)	-0,42	-0,42	-0,42	-0,19	-0,19		
p_k ($\beta = 2,2$)	-0,51	-0,51	-0,51	-0,23	-0,23		

1. Wartości obciążenia, w porównaniu z dotychczasową normą, są większe. Dotyczy to większości przegród i całych konstrukcji (z wyjątkiem pola H, obejmującego przeważającą część nawietrznej połaci dachu), a wynika z kilku przyczyn: ze zwiększenia wartości charakterystycznej ciśnienia prędkości wiatru (o 20% w strefie 1), z przyjęcia wartości szczytowej ciśnienia prędkości jako ciśnienia odniesienia (w stosunku $2,32/1,8 = 1,29$ w terenie A na wysokości 10 m w przypadku budynków, dla których przyjmowano dotychczas $\beta = 1,8$) oraz z większych bezwzględnych wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego, a także z uwzględnienia ciśnienia wewnętrznego. Ponadto

zwiększa się wartość obliczeniowa obciążenia wiatrem w stosunku $1,5/1,3 = 1,15$.

2. Nastąpiło znaczne zwiększenie pracochłonności obliczeń, a także liczby wariantów obciążenia dachów. W przypadku dachów dwuspadowych i kierunku wiatru $\theta = 0^\circ$, w zakresie najczęściej spotykanych kątów spadku między $\alpha = -5^\circ$ a $\alpha = +45^\circ$, należy rozważyć cztery przypadki, w których największe albo najmniejsze wartości we wszystkich polach F , G i H występują łącznie z największymi albo najmniejszymi wartościami w polach I i J . Uwzględniając dodatkowo wpływ ciśnienia wewnętrznego (nad- lub podciśnienia) otrzymuje się osiem wariantów obciążenia. Ponadto dochodzi zróżnicowanie wartości obciążenia ze względu na rozmiary projektowanych elementów.

W przypadku budynków o kątach spadku dachu poniżej 35° wprowadzenie Eurokodu nie spowoduje oczekiwanego zwiększenia wartości charakterystycznych i obliczeniowych obciążenia wiatrem. Przeciwnie, w przypadku niektórych dachów (np. o spadku około 15°), na polu H połaci nawietrznej wartości te będą nawet około dwukrotnie mniejsze od dotychczasowych (por. rys. 2). Budynki o takim kącie spadku dachu są szczególnie narażone na uszkodzenia przez wiatr [1]. Należy zatem roz-

ważyć wprowadzenie dodatkowych postanowień do Załącznika krajowego. Zostało to ostatnio umożliwione przez CEN [4].

Sposób prowadzenia obliczeń współczynnika konstrukcyjnego wskazuje na potrzebę ich uproszczenia przez wykonanie nomogramów dostosowanych do krajowych warunków. Nomogramy zamieszczone w Załączniku D normy [3] odnoszą się jedynie do sytuacji, gdy bazowa prędkość wiatru $v_b = 28$ m/s. Nad nomogramami takimi podjęto już pracę.

Pracochłonność obliczeń zwiększa dodatkowo kombinacja obciążenia wiatrem z obciążeniem śniegiem. Konieczny jest więc wybór pewnych, podstawowych wariantów obciążenia. Zagadnienie to wykracza jednak poza ramy niniejszego artykułu, którego celem było ukazanie obecnego stanu normalizacji obciążenia wiatrem budynków.

PIŚMIENICTWO

- [1] Gaczek M., Żurański J.A.: Uszkodzenia budynków wywołane huraganowym wiatrem. „Inżynier Budownictwa”, cz. 1 nr 9/2008, cz. 2 nr 10/2008.
- [2] PN-B-02011:1977 Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie wiatrem.
- [3] PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część