

Oddziaływanie wiatru na kominny stalowe w ujęciu przepisów normowych

Tomasz Lipecki¹, Jarosław Bęc², Paulina Jamińska³

*^{1,2,3}Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: ¹t.lipecki@pollub.pl, ²j.bec@pollub.pl, ³p.jaminska@pollub.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę odpowiedzi kominów stalowych na oddziaływanie wiatru. Rozpatrzono podejścia zastosowane w normach polskich: dotyczącej kominów stalowych [1] i wiatrowej [2] oraz w Eurokodzie 1 [3]. Porównano oddziaływania w linii wiatru według poszczególnych procedur, a także w kierunku prostopadłym do średniej prędkości wiatru, które jest wywołane wzbudzeniem wirowym oraz odpowiedzi kominów na te obciążenia wyrażone za pomocą przemieszczeń wierzchołków. Do analiz przyjęto istniejące kominny stalowe, które niemal wszystkie uległy awariom, głównie wskutek wzbudzenia wirowego. Wszystkie kominny i oddziaływania zostały zamodelowane w programie MES – Autodesk Mechanical Simulation 2013.

Słowa kluczowe: kominny stalowe, oddziaływanie wiatru, wzbudzenie wirowe

1. Wprowadzenie

Rozpatrując oddziaływanie wiatru na kominny stalowe należy wziąć pod uwagę jego dwa rodzaje: wzdłuż średniej prędkości wiatru i prostopadłe do kierunku średniej prędkości, powodowane wirami Benarda-Kármána. Oszacowanie pierwszego rodzaju obciążeń we wszystkich w zasadzie normach na świecie jest oparte na modelu matematycznym stworzonym przez Alana Davenporta w latach 70-tych. (m.in. [4, 5]). Eurokod 1 [3] pozwala określać obciążenie na podstawie wartości szczytowych prędkości wiatru, podczas gdy normy polskie [1, 2] szacują obciążenie na podstawie wartości średnich dziesięciominutowych prędkości wiatru. Obciążenie prostopadłe według Eurokodu można przyjmować na podstawie dwóch alternatywnych procedur. Pierwsza z nich, stworzona przez Ruscheweyha [6, 7] uwzględnia rezonansowe wzbudzenie wirowe. Podstawy drugiej zostały zaproponowane przez Vickery'ego [8, 9], następnie zmodyfikowane przez Hansena i Dyerby'ego [10, 11] i w tej formie obowiązują one w Eurokodzie. Zastosowanie obu procedur prowadzi do uzyskania bardzo znacznie różniących się wyników. W Normie Polskiej [1] zastosowano uproszczony model Ruscheweyha. Fenomen wzbudzenia wirowego oraz analizy różnych podejść normowych opisujących drgania powodowane wirami kominów stalowych były szeroko opisywane w literaturze, wraz z opisami przypadków konstrukcji, które uległy awariom [12-27].

W niniejszej pracy analizowano oddziaływanie wiatru w linii jego działania i w kierunku prostopadłym w odniesieniu do trzech grup kominów stalowych: 1) typ 1 – o stałej średnicy zewnętrznej, 2) typ 2 – zbieżne w części dolnej, 3) typ 3 – zbieżne wzdłuż całej wysokości. Na podstawie danych przyjętych z literatury zostały stworzone modele metody elementów skończonych w odniesieniu do każdego z kominów.

2. Normowe oddziaływanie w linii działania wiatru

Zgodnie z polskimi normami [1, 2] statyczne oddziaływanie wiatru, równoważne co do skutków dynamicznemu, jest określane w jednostkach ciśnienia według wzoru:

$$p_x = q_k C_e C_x C_{te} \beta, \quad (1)$$

gdzie: q_k – ciśnienie charakterystycznej prędkości wiatru, C_e – współczynnik ekspozycji, C_x – współczynnik oporu aerodynamicznego, C_{te} – współczynnik planowanego czasu użytkowania, β – współczynnik działania porywów wiatru.

Według zaleceń Eurokodu 1 [3] siła wywierana przez wiatr na konstrukcję określane jest zgodnie ze wzorem:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) A_{ref}, \quad (2)$$

gdzie: $c_s c_d$ – współczynnik konstrukcyjny, wyznaczony dla wysokości odniesienia $z_s = 0,6H$, będący iloczynem c_s – współczynnika zmniejszającego obciążenie ze względów na wymiary konstrukcji oraz c_d – współczynnika dynamicznego zwiększającego obciążenie ze względu na porywy wiatru, c_f – współczynnik siły aerodynamicznej, $q_p(z_e)$ – ciśnienie szczytowe prędkości wiatru na poziomie danego segmentu konstrukcji, A_{ref} – pole powierzchni odniesienia, na które działa wiatr.

3. Normowe oddziaływanie w kierunku prostopadłym

Polskie normy [1, 2] podają dwie procedury obliczeniowe: uproszczoną przyjmującą oddziaływanie wiatru jako statyczne równoważne co do skutków rzeczywistemu obciążeniu dynamicznemu oraz szczegółową przyjmującą dynamiczne oddziaływanie wiatru o charakterze wymuszenia harmonicznego zgodnego z częstotliwością drgań własnych konstrukcji. Obciążenie w obu procedurach należy przykładać w obszarze maksymalnych ugięć konstrukcji na odcinku długości korelacyjnej $0,25H$, nie mniejszej niż $6D$ (H – wysokość komina, D – średnica). Procedura uproszczona, może być stosowana tylko dla pierwszej postaci drgań, gdy smukłość $H/D < 30$, $Sc < 15$, planowany czas użytkowania jest mniejszy niż 20 lat, a obciążenie w [kN/m] wyrażone jest wzorem:

$$p_y = \frac{0,05\rho}{T_1^2 \delta_s} c_{lat} D^3, \quad (3)$$

w którym: ρ – gęstość powietrza, T_1 – podstawowy okres drgań własnych, δ_s – logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcyjnego, c_{lat} – współczynnik aerodynamiczny siły bocznej.

Według procedury szczegółowej, oddziaływanie dynamiczne w i -tej postaci drgań jest określane według wzoru:

$$p_{y,i} = \frac{\rho v_{kr,i}^2}{2} D c_{lat,i} \sin(\omega_i t), \quad (4)$$

w którym ω_i – i -ta częstość kołowa drgań własnych.

Eurokod 1 [3] pozwala stosować dwie procedury służące do określenia obciążenia poprzecznego. Obie oparte są na wyznaczeniu maksymalnych przemieszczeń powodowanych wzbudzeniem wirowym. Obciążenie uwzględniające siły bezwładności jest przykładać zgodnie z postacią drgań i i określane dla j -tego węzła konstrukcji według wzoru:

$$F_{i,j} = m_j (2\pi n_{i,j})^2 \Phi_{i,y,j} \max y_F, \quad (5)$$

gdzie: m_j – masa drgająca w punkcie j , $n_{i,j}$ – częstotliwość drgań własnych odpowiadająca i -tej postaci, $\Phi_{i,y,j}(z)$ – unormowana i -ta postać drgań.

Procedura 1. Wykorzystywany jest model wzbudzenia wirowego stworzony przez Ruscheweyha [6, 7]. W modelu przyjmuje się efektywne obciążenie wzbudzeniem wirowym jako obciążenie równomiernie rozłożone w ograniczonym obszarze konstrukcji zwanym efektywną długością korelacyjną L_j . Zwiększenie obciążenia spowodowane efektem lock-in jest w modelu uwzględnione poprzez sprzężenie długości korelacyjnej z amplitudą drgań porzecznych komina (y_j) wywołanych wirami. Stosunek długości korelacyjnej do średnicy zewnętrznej budowli L_j/D zależy od stosunku amplitudy drgań do średnicy zewnętrznej y_F/D , według następujących relacji: gdy $y_F/D < 0,1$ wtedy $L_j/D = 6,0$, gdy $0,1 < y_F/D < 0,6$ wtedy $L_j/b = 4,8 + 12 y_F/b$, gdy $y_F/D > 0,6$ wtedy $L_j/b = 12$. Maksymalna amplituda drgań przy krytycznej prędkości wiatru wyrażona jest wzorem:

$$\frac{\max y_F}{D} = K_w K_{c_{lat}} \frac{1}{St^2} \frac{1}{Sc}, \quad (6)$$

w którym D – średnica zewnętrzna komina na odcinku efektywnej długości korelacyjnej, K_w – współczynnik efektywnej długości korelacyjnej, K – współczynnik postaci drgań, c_{lat} – współczynnik aerodynamiczny siły bocznej, St – liczba Strouhala, Sc – liczba Scrutona.

Do wyznaczenia maksymalnej amplitudy drgań ($\max y_j$) konieczna jest procedura iteracyjna, która polega na założeniu wstępnej amplitudy y_j , na jej podstawie wyznaczeniu długości korelacyjnej L_j , a następnie współczynników c_{lat} i K_w (zależą od L_j) oraz K i $\max y_F$ według wzoru (6). Iteracja jest szybko zbieżna, przeważnie niezbędne są 2 lub 3 kroki.

Procedura 2. Podstawy teoretyczne modelu, zwanego modelem Vickery-Clark lub Vickery-Basu, wykorzystanego w procedurze 2 przedstawiono m.in. w pracach [8, 9]. W Eurokodzie 1 wykorzystano powyższy model zmodyfikowany przez Dyrbye i Hansena [10, 11], którzy uwzględnili wpływ intensywności turbulencji. Maksymalne przemieszczenie wywołane wirami wyznacza się ze wzoru:

$$y_{\max} = \sigma_y \cdot k_p, \quad (8)$$

w którym σ_y – odchylenie standardowe przemieszczeń w punkcie maksymalnych ugięć, k_p – współczynnik wartości szczytowej. Odchylenie standardowe jest wyznaczane ze wzoru:

$$\frac{\sigma_y}{D} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{C_c}{\sqrt{\frac{Sc}{4\pi} - K_a} \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_y}{Da_L} \right)^2 \right]} \cdot \sqrt{\frac{\rho D^2}{m_e}} \cdot \sqrt{\frac{D}{H}}, \quad (9)$$

uzależnionego od trzech parametrów: C_c , K_a – parametry aerodynamiczne zależne od intensywności turbulencji, liczby Reynoldsa, postaci drgań, prędkości wiatru i zmian średnicy konstrukcji wzdłuż wysokości, a_L – amplituda graniczna uzyskana przy bardzo niskim tłumieniu. Ponadto, we wzorze (9) m_e – masa efektywna na jednostkę długości.

Współczynnik wartości szczytowej należy wyznaczać według wzoru:

$$k_p = \sqrt{2} \left\{ 1 + 1,2 \arctan \left[0,75 \left(\frac{Sc}{4\pi K_a} \right)^4 \right] \right\}, \quad (10)$$

a jego wartość zawiera się w przedziale 3,5-4 dla niskich amplitud drgań, zaś wynosi $\sqrt{2}$ w przypadku wysokich amplitud drgań.

4. Analizowane kominy stalowe

W analizach rozpatrzono 35 kominów o stałej średnicy (typ 1, Tabela 1), 38 kominów o zbieżnej dolnej części i górnej ze stałą średnicą (typ 2, Tabela 2) oraz 9 kominów zbieżnych wzdłuż całej wysokości (typ 3, Tabela 3). W tabelach wprowadzono następujące oznaczenia: H – wysokość, H_1 – fragment wysokości, na której komin jest zbieżny, D , D_T , D_B – średnica zewnętrzna, średnica zewnętrzna górna i dolna, m_e – dana masa równoważna kominą, δ_s – logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcyjnego, f_1 – pierwsza częstotliwość drgań własnych, $\lambda = H/D$ ($\lambda = H/D_T$) – smukłość kominą, m_{e_obl} , Sc_{obl} , f_{1obl} , $V_{kr,1}$ – masa równoważna, liczba Scrutona, pierwsza częstotliwość drgań własnych, pierwsza prędkość krytyczna wyznaczone w obliczeniach. Dla każdego z kominów stworzono model MES i jako pierwszy etap wykonano analizę modalną. W modelach MES dokładnie odwzorowano daną masę m_e , natomiast nie udało się w każdym przypadków zachować częstotliwości drgań własnych. Z uwagi na brak pełnych danych na temat sztywności kominów oraz okresu eksploatacji, dla którego mierzono częstotliwości drgań własnych takie podejście wydaje się uzasadnione.

Tabela 1. Zestawienie charakterystyk kominów typu 1

Lp	H	D	m_e	δ_s	f_1	λ	m_{e_obl}	Sc_{obl}	f_{1obl}	$V_{kr,1}$
	[m]	[m]	[kg/m]	[-]	[Hz]	[-]	[kg/m]	[-]	[Hz]	[m/s]
1	17	0,6	95	0,025	2	28,33	95,3	10,6	2,227	6,7
2 ⁽¹⁾	23	1,5	510	0,038		15,33	511,2	13,8	2,271	17,0
3	25,5	1,8	360	0,031		14,17	359,7	5,5	2,898	26,1 ⁽³⁾
4	25,5	0,71	199	0,025	0,72	35,92	199,1	15,8	1,102	3,9
5	26	1,25	199,2	0,030	1,88	20,80	199,6	6,1	1,991	12,4
6	28	0,914	88,8	0,015	1,72	30,63	88,8	2,6	1,872	8,6
7	29	1,4	216	0,019		20,71	216,9	3,4	1,687	11,8
8	30	0,816	135,7	0,020	1,06	36,76	135,5	6,5	1,094	4,5
9	30	0,711	157	0,025	0,7	42,19	157,0	12,4	0,848	3,0
10	31	1,5	240	0,031	1,5	20,67	242,1	5,3	1,796	13,5
11	31	1,35	215	0,031	1,6	22,96	217,5	5,9	1,619	10,9
12	34	0,813	159	0,025	0,76	41,82	159,1	9,6	0,761	3,1
13	35	1,8	280	0,019		19,44	276,2	2,6	1,763	15,9
14	35	0,813	201,6	0,015	0,61	43,05	201,8	7,3	0,751	3,1
15 ⁽¹⁾	38	3,3	1080	0,031		11,52	1085,5	4,9	1,888	31,1 ⁽³⁾⁽⁴⁾
16	38	1,016	231	0,030	0,68	37,40	231,4	10,8	0,847	4,3
17	40,5	1,65	22 ⁽²⁾	0,025	0,81	24,52	461,1	6,8	1,169	9,6
18	40,7	1,42	29 ⁽²⁾	0,025	0,68	28,66	639,8	12,7	0,937	6,7
19 ⁽¹⁾	41	3,04	1166	0,038		13,49	1170,1	7,7	1,362	20,7
20	45	1,12	182	0,025	0,62	40,18	182,6	5,8	0,753	4,2
21 ⁽¹⁾	46	3,2	3280	0,038		14,38	3281,7	19,5	0,910	14,6
22	46	1,8	447	0,025	0,9	25,56	448,0	5,5	1,012	9,1
23	48,7	1,62	181	0,025	0,72	30,06	181,5	2,8	0,952	7,7
24	54	3,9	61 ⁽²⁾	0,031	1,1	13,85	894,7	2,9	1,604	31,3 ⁽³⁾
25	55	2,04	49 ⁽²⁾	0,031	1,09	26,96	652,1	7,8	0,866	8,8
26	58,8	2,4	63 ⁽²⁾	0,031	0,68	24,50	879,4	7,6	0,620	7,4
27	60	1,575	233	0,031	0,5	38,10	232,5	4,6	0,532	4,2
28	60	2	315	0,013	0,8	30,00	314,6	1,6	0,696	7,0
29	60	2	345	0,125	0,77	30,00	345,2	17,3	0,665	6,7
30	61	3,35	620	0,038	0,97	18,21	619,6	3,4	1,026	17,2
31 ⁽¹⁾	61	3,35	2040	0,057	0,71	18,21	2039,5	16,6	0,556	9,3
32	65	1,91	58 ⁽²⁾	0,031	0,71	34,03	648,8	8,8	0,589	5,6
33	80	3,96	5096,5	0,020	0,53	20,20	5093,7	10,4	0,483	9,6
34	90	2,3	661	0,040	0,29	39,13	660,8	8,0	0,303	3,5
35	90	2,3	661	0,070	0,29	39,13	660,8	14,0	1,000	11,5

Tabela 2. Zestawienie charakterystyk kominów typu 2

Lp.	H	H ₁	D _T	D _B	m _e	δ _s	f ₁	λ	m _{e obl}	SC _{obl}	f _{1obl}	V _{kr,1}
	[m]	[m]	[m]	[m]	[kg/m]	[-]	[Hz]	[-]	[kg/m]	[-]	[Hz]	[m/s]
1	28	6,16	1,6	2,304	255	0,031		17,50	255,1	4,9	2,774	22,2 ⁽³⁾
2	30,50	7,625	1,4	2,45	275	0,025		21,79	274,6	5,6	2,016	14,1
3	30,5	7,625	1,4	2,45	330	0,025	1,6	21,79	331,3	6,8	2,251	15,8
4	36	0,72	1,5	2,325	230	0,025	1,04	24,00	230,2	4,1	1,180	8,9
5	36	12,96	0,4	0,904	85	0,019	0,4	90,00	84,9	16,1	0,537	1,1
6	40	12	1,45	2,32	214	0,038		27,59	214,8	6,2	1,801	13,1
7 ⁽¹⁾	43	12,9	1,8	3,294	895	0,031		23,89	894,4	13,7	0,908	8,2
8	43	12,9	1,8	3,294	300	0,019	1	23,89	299,8	2,8	1,578	14,2
9	43,5	15,225	1,68	3,024	330	0,025	0,95(0,5)	25,89	331,4	4,7	1,330	11,2
10 ⁽¹⁾	44	11	1,450	2,596	490	0,031		30,34	491,5	11,6	0,705	5,1
11	44,7	12,069	2,54	3,581	500	0,019	1,2	17,60	499,6	2,4	1,626	20,7
12 ⁽¹⁾	44,7	12,069	2,54	3,581	950	0,031	0,91	17,60	950,4	7,3	1,178	15,0
13	45	13,5	1,83	2,928	270	0,038		24,59	270,7	4,9	1,512	13,8
14	45,7	11,882	1,22	3,05	190	0,025	0,92	37,46	188,4	5,1	1,193	7,3
15 ⁽¹⁾	45,7	10,511	2,2	3,036	735	0,031		20,77	734,2	7,5	0,913	10,0
16	46	18,4	1,7	3,74	262	0,025	-	27,06	261,1	3,6	1,535	13,0
17 ⁽¹⁾	46	18,4	1,7	3,74	650	0,038	-	27,06	649,5	13,7	0,966	8,2
18 ⁽¹⁾	46	13,34	1,4	2,8	450	0,038		32,86	449,8	14,0	0,702	4,9
19 ⁽¹⁾	46	11,04	2,2	3,432	745	0,031		20,91	744,8	7,6	0,928	10,2
20 ⁽¹⁾	47,5	15,2	2	2,66	755	0,044	0,9	23,75	755,0	13,3	0,753	7,5
21 ⁽¹⁾	49	15,19	2,9	5,22	955	0,038		16,90	955,6	6,9	1,080	15,7
22	55	17,05	2,14	3,681	323	0,025	1,1	25,70	322,1	2,8	1,308	14,0
23	56	3,92	2,4	3,768	780	0,031	0,83	23,33	779,6	6,7	0,817	9,8
24	60	36	1	1,6	148	0,031	1,37(0,6)	60,00	148,6	7,4	0,754	3,8
25	61	15,25	2,1	3,675	410	0,025	0,66	29,05	408,8	3,7	0,861	9,0
26	68,5	27,4	3,45	5,693	680	0,025	1,12	19,86	682,9	2,3	1,234	21,3
27 ⁽¹⁾	68,5	27,4	3,45	5,693	1470	0,038	0,82	19,86	1469,6	7,5	0,836	14,4
28	72	23,76	2,5	4,225	470	0,025		28,80	469,3	3,0	0,876	11,0
29 ⁽¹⁾	72	23,76	2,5	4,225	980	0,038	0,8	28,80	979,9	9,5	0,601	7,5
30 ⁽¹⁾	74	18,5	3,5	5,25	1640	0,038		21,14	1642,2	8,2	0,589	10,3
31	74	24,42	3	4,5	595	0,019	0,66	24,67	595,6	2,0	1,060	15,9
32 ⁽¹⁾	76	28,88	4,9	8,33	2175	0,05	1,05	15,51	2174,3	7,2	1,010	24,7 ⁽³⁾
33	76	23,56	2,75	6,105	450	0,025		27,64	453,5	2,4	0,940	12,9
34 ⁽¹⁾	76	19,76	2,9	4,35	1270	0,031	0,68	26,21	1270,1	7,5	0,553	8,0
35 ⁽¹⁾	76,2	15,24	2,62	3,563	970	0,038	0,6	29,08	971,4	8,6	0,387	5,1
36	90	23,4	4,5	5,49	1098	0,025		20,00	1098,2	2,2	0,811	18,2
37	91,5	29,28	4,88	8,247	765	0,031	1	18,75	765,1	1,6	1,118	27,3 ⁽³⁾
38	145	34,8	6	10,08	1950	0,025	0,48	24,17	1943,5	2,2	0,456	13,7

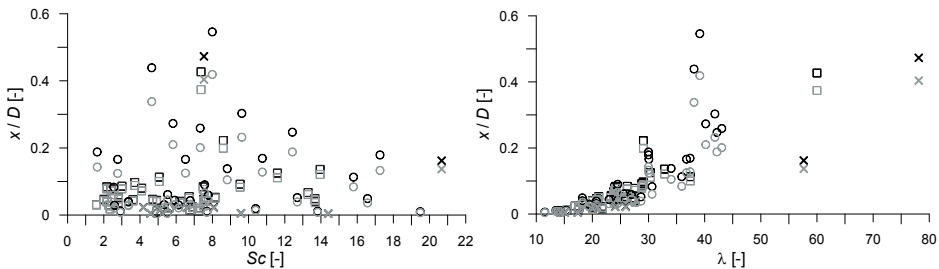
Tabela 3. Zestawienie charakterystyk kominów typu 3

Lp	H	D _T	D _B	m _e	δ _s	f ₁	λ	m _{e obl}	SC _{obl}	f _{1obl}	V _{kr,1}
	[m]	[m]	[m]	[kg/m]	[-]	[Hz]	[-]	[kg/m]	[-]	[Hz]	[m/s]
1	37	2,5	3,68	450	0,038		15,10	452,4	4,6	3,221	39,5 ⁽³⁾⁽⁴⁾
2 ⁽¹⁾	49	0,9	2,32	245	0,038		57,65	245,6	20,7	1,043	4,4
3 ⁽¹⁾	67	3,9	9,16	3510	0,038	0,84	17,40	3510,5	14,4	1,646	31,7 ⁽³⁾
4 ⁽¹⁾	73	5,1	7,91	4100	0,038	0,64	14,31	4097,4	9,6	1,191	30,4 ⁽³⁾
5	75	1	3,17	140	0,031	1,25 (0,8)	78,13	140,0	7,5	0,875	4,2
6	77	3,2	5,54	1360	0,031	0,69	24,06	1361,4	6,6	1,050	16,8
7	83	3,2	6,4	1360	0,038	1,15 (1,2)	25,94	1360,2	8,1	1,073	17,2
8	90	4,5	7,2	2090	0,031	0,75 (0,8)	20,00	2088,6	5,1	0,978	22,0
9 ⁽¹⁾	92	4,4	6,92	2010	0,025	0,68 (0,8)	20,89	2010,2	4,2	0,851	18,6

⁽¹⁾ występuje izolacja kominu, ⁽²⁾ masa całkowita kominu w tonach, ⁽³⁾ zgodnie z normą polską nie trzeba liczyć wzbudzenia wirowego, ⁽⁴⁾ zgodnie z Eurokodem nie trzeba liczyć wzbudzenia wirowego.

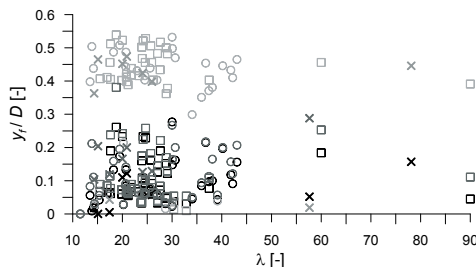
5. Wyniki analiz

Przy analizowaniu obciążenia w linii działania wiatru przyjęto teren otwarty (kategoria A według norm polskich i najbardziej odpowiadająca jej kategoria 2 według Eurokodu). W obliczeniach zastosowano dwie procedury wyznaczania współczynnika konstrukcyjnego $c_s c_d$. W większości przypadków uzyskano wystarczającą zgodność, poniżej 5% różnicy między wartościami, co może stanowić potwierdzenie poprawności modelu MES. W każdym przypadku wartości większe wyznaczono według procedury 2. Obliczenia statyczne MES wykonano przyjmując obciążenie ze współczynnikiem konstrukcyjnym wyznaczonym według procedury 1, jako bardziej prawdopodobnym. Należy zaznaczyć, że wartości $c_s c_d$, a więc i wartości obciążenia są bardzo wrażliwe na wybór kategorii terenu oraz przyjęcie logarytmicznego dekrementu konstrukcyjnego tłumienia drgań kominia. Na Rys. 1 pokazano unormowane przemieszczenia wierzchołków kominów (x/D) w zależności od liczby Sc i smukłości, obliczone na podstawie norm polskich [1, 2] i Eurokodu 1 [3].

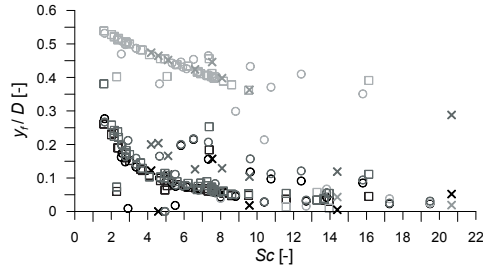


Rys. 1. Unormowane przemieszczenia wierzchołków x/D w funkcji liczby Sc i smukłości kominia λ , dla kominów: \circ – typu 1 [1,2], \square – typu 2, [1,2] \times – typu 3, [1,2], \circ – typu 1, [3], \square – typu 2, [3], \times – typu 3, [3]

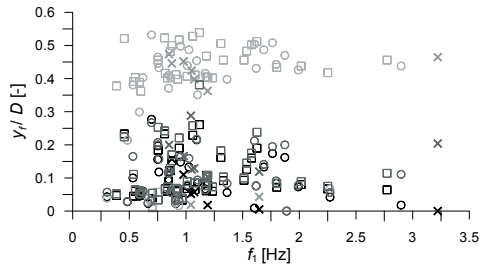
Przy analizowaniu wzbudzenia wirowego według norm polskich przyjęto liczbę $St = 0,2$, natomiast według Eurokodu $St = 0,18$ zgodnie z zaleceniami odpowiednich norm. W tabelach 1-3 dodano przy odpowiednich kominach adnotacje o nie obliczaniu obciążenia wzbudzeniem wirowym, z uwagi na inne wymogi dotyczące konieczności jego uwzględnienia. Według polskich norm $V_{kr} > V_k$, według Eurokodu $V_{kr} > 1,25V_{m,Lj}$ oznacza, że obciążenie może nie zostać uwzględnione. Uzyskane według Eurokodu wartości maksymalnej amplitudy drgań posłużyły do przyjęcia obciążenia statycznego, które zostało następnie wykorzystane w statycznej analizie liniowej w programie MES.



Rys. 2. Unormowane poprzeczne przemieszczenia wierzchołków y/D w funkcji smukłości kominia λ , dla kominów: \circ – typu 1, [3], proc. 1, \square – typu 2, [3], proc. 1, \times – typu 3, [3], proc. 1, \circ – typu 1, [1,2], \square – typu 2, [1,2], \times – typu 3, [1,2], \circ – typu 1, [3], proc. 2, \square – typu 2, [3], proc. 2, \times – typu 3, [3], proc. 2



Rys. 3. Unormowane poprzeczne przemieszczenia wierzchołków y/D w funkcji liczby Sc , dla kominów: \circ – typu 1, [3], proc. 1, \square – typu 2, [3], proc. 1, \times – typu 3, [3], proc. 1, \circ – typu 1, [1,2], \square – typu 2, [1,2], \times – typu 3, [1,2], \circ – typu 1, [3], proc. 2, \square – typu 2, [3], proc. 2, \times – typu 3, [3], proc. 2



Rys. 4. Unormowane poprzeczne przemieszczenia wierzchołków y/D w funkcji częstotliwości drgań własnych f_1 , dla kominów: \circ – typu 1, [3], proc. 1, \square – typu 2, [3], proc. 1, \times – typu 3, [3], proc. 1, \circ – typu 1, [1,2], \square – typu 2, [1,2], \times – typu 3, [1,2], \circ – typu 1, [3], proc. 2, \square – typu 2, [3], proc. 2, \times – typu 3, [3], proc. 2

Przemieszczenia przy obciążeniu siłami bezwładności były zbliżone do przemieszczeń wyznaczonych od samych wirów, a zależności między nimi były podobne. Stąd na Rys. 2, Rys. 3 i Rys. 4 pokazano przemieszczenia końcowe uzyskane po analizach MES w formie wartości unormowanych y/D w zależności od Sc , λ i f_1 .

6. Analiza wyników

W pracy przedstawiono analizę oddziaływania wiatru na kominny stalowe w dwóch kierunkach: zgodnym i prostopadłym do średniej prędkości wiatru. W przypadku obciążenia parciem wiatru wykorzystano dwa podejścia szacujące to obciążenie, oparte na modelu Davenporta i obowiązujące w polskich normach [1,2] oraz Eurokodzie [3]. Wzbudzenie wirowe przyjęto jako statyczne równoważne dynamicznemu jak nakazuje norma [1] oraz w dwóch wersjach rekomendowanych przez normę [3]: według modelu Ruscheweyha i Vickery'ego-Basu (Vickery'ego-Clarka). W systemie metody elementów skończonych przeprowadzono analizy statyczne, w wyniku których wyznaczono przemieszczenia wierzchołków kominów.

W przypadku obciążenia w linii działania wiatru przemieszczenia wierzchołków uzyskane według obydwu metod [1,2] oraz [3] są do siebie zbliżone. Przy założonych w obliczeniach parametrach nieznacznie większe przemieszczenia wyznaczono według [1, 2]. Różnice względne między przemieszczeniami wierzchołka według obydwu podejść są w granicach 22,3-30,8% dla kominów typu 1, 0,6-14,4% dla kominów typu 2, 2-15,4% dla typu 3. Ponadto, największe przemieszczenia unormowane x/D wykazują kominny typu 1 i kilka kominów z grupy 2. Większe różnice bezwzględne między przemieszczeniami uzyskano dla większych smukłości kominów. Nie zauważono natomiast wyraźnej

zależności przemieszczeń od liczby Sc . W analizach według Eurokodu wykorzystano procedurę pierwszą obliczania współczynnika konstrukcyjnego $c_s c_d$. Wykorzystanie procedury drugiej zwiększało obciążenie do około 5%. W obliczeniach zastosowano wyznaczoną w analizie modalnej postać drgań rzeczywistego komina, która w niektórych przypadkach w nieznanym stopniu odbiegała od postaci drgań założonej w Eurokodzie, dla której określone są współczynniki służące do obliczania $c_s c_d$ według procedury 2. Normy polskie wyróżniają 3 kategorie terenu, podczas, gdy Eurokod – 5. Przejście między zaleceniami jednej normy i drugiej wiąże się więc z dobraniem odpowiedniej kategorii terenu. Może to powodować powstanie różnic w obliczonym obciążeniu i odpowiedzi komina.

W przypadku obciążenia prostopadłego, przemieszczenia obliczone zgodnie z normami [1, 2] są zbliżone do rezultatów uzyskanych zgodnie z procedurą 1 (Ruscheweyha) z Eurokodu i są nieznanie od nich większe. Wyniki wyznaczone z wykorzystaniem procedury 2 Eurokodu są znacznie wyższe. Norma [1] wykorzystuje zmodyfikowany model długości korelacyjnej Rucheweyha, ale zakłada wzbudzenie wirowe na długości korelacyjnej ustalonej na poziomie stałym i równym $0,25H$. W większości przypadków prowadzi to do uzyskania większego obszaru komina, wzdłuż którego może powstawać wzbudzenie wirowe niż ma to miejsce przy wykorzystaniu procedury iteracyjnej zgodnej z Eurokodem. Różnice przemieszczeń obliczonych według procedur zawartych w normach [1, 2] oraz procedury 1 z normy [3] wynikają również z przyjęcia innej wartości liczby Strouhala: normy polskie nakazują przyjmować 0,2, a Eurokod 0,18 dla przekroju kołowego. Prowadzi to do uzyskania innej prędkości krytycznej, dla której występuje wzbudzenie. Różnice występują również w wartościach logarytmicznego dekrementu tłumienia aerodynamicznego uzyskanego na podstawie obydwu norm, które to różnice również dość silnie oddziałują na wyniki. Użycie procedury 2 rekomendowanej przez Eurokod prowadzi do wyznaczenia dużo wyższych przemieszczeń kominów. W przypadku kominów typu 1 procedura 2 daje rezultaty większe od uzyskanych według procedury 1 średnio ok. 4,6 razy (w jednym przypadku różnice wyniosła 58 razy, a w dwóch przemieszczenie uległo zmniejszeniu). Dla kominów typu 2 procedura 2 dała wyniki wyższe średnio również 4,6 razy (w dwóch przypadkach uzyskano mniejsze przemieszczenia). W przypadku kominów typu 3 przemieszczenia były większe średnio o 6,5%, ale należy zaznaczyć, że liczba analizowanych kominów była dużo mniejsza (w jednym przypadku przemieszczenie było mniejsze, w drugim było większe ponad 20 razy). Zmniejszenie wartości przemieszczeń wyznaczonych według procedury 2 miało miejsce w przypadku kominów charakteryzujących się wysoką liczbą Scrutona, a więc takich, dla których przeważają siły tłumienia nad siłami bezwładności. W przypadku wysokich liczb Scrutona niskie wartości przemieszczeń spowodowane są rozwiązaniem równania (9).

Analizując zależność przemieszczeń od liczby Sc , można zauważyć oczywistą prawidłowość, że dla niższych liczb Sc uzyskane przemieszczenia są wyższe i odnosi się to do wszystkich typów kominów. Wraz ze wzrostem liczby Sc wartości przemieszczeń y_f spadają asymptotycznie do 0. Podczas analizy unormowanego przemieszczenia y_f/D wyraźnie zauważalne jest zmniejszanie się przemieszczeń wraz ze wzrostem Sc wzdłuż krzywej wykładniczej, w przypadku polskich norm oraz procedury 1 z Eurokodu oraz niemal liniowy spadek w przypadku procedury 2 z Eurokodu. Najwyraźniej tendencja ta jest zaznaczona dla kominów typu 2.

Zależność przemieszczeń od smukłości kominów λ nie wykazuje żadnej dominującej tendencji, przemieszczenia uzyskane według procedury 2 są wyższe w podobnym zakresie dla każdej smukłości. Podobnie nie zauważono charakterystycznej zależności pomiędzy

odpowiedzią kominów a pierwszą częstotliwością drgań własnych, w odniesieniu do której analizowano wzbudzenie. Dla analizowanych kominów zakres częstotliwości to $f_1 = 0,303\text{--}3,221$ Hz. Wyższa wartość f_1 powoduje oczywiście oszacowanie wyższej prędkości krytycznej, a więc i zwiększenie obciążenia poprzecznego, ale z drugiej strony świadczy też o tym, że komin jest sztywniejszy, czyli mniej podatny na drgania poprzeczne wywołane wirami.

7. Wnioski

Przemieszczenia wierzchołków kominów w przypadku oddziaływania wiatru wzdłuż jego linii wyznaczone z uwzględnieniem wszystkich analizowanych przepisów są zbliżone. Wpływ na powstawanie ewentualnych różnic ma sposób definicji chropowatości terenu w poszczególnych normach, jak też przyjęte tłumienie konstrukcyjne, wykorzystana procedura wyznaczania współczynnika konstrukcyjnego.

Znaczne różnice są zauważalne w przypadku obciążenia poprzecznego. W przypadku kominów o niższych liczbach Sc uzyskane przemieszczenia są wyższe i dotyczy to wszystkich typów kominów, niezależnie od częstotliwości drgań własnych. Zależność przemieszczeń od smukłości kominów λ nie wykazuje żadnej dominującej tendencji. Istotny wpływ na otrzymane wyniki mają: przyjęta wielkość liczby St , założone tłumienie konstrukcyjne, przyjęty obszar wzbudzenia wirowego, a przede wszystkim zastosowana procedura.

Generalnie wyznaczone przemieszczenia od obciążenia w linii wiatru były nawet kilkukrotnie mniejsze niż przemieszczenia przy oddziaływaniu poprzecznym, powodowanym odrywaniem się wirów. Nie uwzględnienie obciążenia poprzecznego powoduje zaniedbanie istotnych sił wymiarujących przekroje konstrukcji i jak wyraźnie stwierdzają normy nie może być pominięte.

Literatura

- 1 PN- 93/B-03201. Konstrukcje stalowe. Kominy. Obliczenia i projektowanie. PKN, 1993.
- 2 PN-77/B-02011. Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem. PKN, 1977.
- 3 PN-EN 1991-1-4. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływanie wiatru. PKN, 2008
- 4 Davenport A.G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 87 (1961) 194-211.
- 5 Davenport A.G. The relationship of wind structure to wind loading, *Proceedings of the 1st Conference on Wind Effects on Building and Structures*, Teddington, England, 1965
- 6 Ruscheweyh H. Codification of vortex excited vibrations. Recent advances in wind engineering. *Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Symposium on Wind Engineerig.*, Beijing, China, Int. Acad. Publ., Pergamon Press 1 (1989) 362-72.
- 7 Ruscheweyh H. Windlastannahmen für turmartige Bauwerke, *DIN-Mitt* 71(11) (1992) 644-47.
- 8 Vickery B.J., Clark A.W. Lift or across-wind response of tapered stacks. *ASCE Journal of Structural Division* 98(1) (1972) 1-20.
- 9 Vickery, B.J., Basu, R.I. Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. Part I & Part II. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 12 (1983) 49-73 & 75-97.
- 10 Dyrbye, C., Hansen, S.O., 1997. *Wind Loads on Structures*. Wiley, New York.
- 11 Hansen S.O. Vortex-induced vibrations of line-like structures. *CICIND Report* 15(1) (1999) 15–23.
- 12 Pritchard B.N. Steel chimney oscillations: A comparative study of their reported performance versus predictions using existing techniques. *Engineering Structures* 6 (1999) 315-323.
- 13 Ciesielski R., Gaczek M., Kawecki J. Observation of cross-wind response of towers and steel chimneys. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 41-44 (1992) 2205-2211.

- 14 Galemann T., Ruscheweyh H. Measurements of wind induced vibrations of a full-scale steel chimney. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 41–44 (1999) 241–252.
- 15 Ruscheweyh H., Galemann T. Full-scale measurements of wind-induced oscillations of chimneys. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 65 (1996) 55-62.
- 16 Verwiebe C., Burger W. Unerwartet starke wirbelerregte Querschwingungen eines 49 m hohen Stahlschornsteins. *Stahlbau* 67(11) (1998) 876-878.
- 17 Tranvik P., Alpsten G. Dynamic behaviour under wind loading of a 90m steel chimney. Alstom Power Sweden AB, Report S-01041/9647-3, 2002.
- 18 Włodarczyk W. Wzbudzenie wirowe drgań według Eurokodu 1 jako oddziaływanie wiatru na kominę stalowe. *Inżynieria i Budownictwo* 10 (2006) 530-533.
- 19 Kalabińska J. Analiza podatności kominów stalowych na wzbudzenie wirowe według ujęć normowych. *Inżynieria i Budownictwo* 3 (2007) 199-202.
- 20 Flaga A., Lipecki T. Code approaches to vortex shedding and own model. *Engineering Structures* 32(6) (2010) 1530-1536.
- 21 Verboom G.K., van Koten H. Vortex excitation: Three design rules tested on 13 industrial chimneys. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 98 (2010) 145–154.
- 22 Wichtowski B., Żurański J.A. Pewne przypadki rezonansu wiatrowego kominów stalowych. *Inżynieria i Budownictwo* 3 (2011) 154-156.
- 23 Clobes M., Willecke A., Peil U. Vortex excitation of steel chimneys: Two ultimate limit states. *Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering*, Amsterdam, 2011.
- 24 Włodarczyk W. Wzbudzenie wirowe drgań w projektowaniu kominów stalowych według PN-EN 1991-1-4 i PN-EN 1993-3-2. *Inżynieria i Budownictwo* 11 (2012) 576-579.
- 25 Lipecki T., Flaga A. Vortex excitation model. Part I. mathematical description and numerical implementation. *Wind and Structures, An International Journal* 16(5) (2013) 457-476.
- 26 Lipecki T., Flaga A. Vortex excitation model. Part II. application to real structures and validation. *Wind and Structures, An International Journal* 16(5) (2013) 477-490.
- 27 Van Koten H. Wind induced vibrations of chimneys: the rules of the CICIND code for steel chimneys. *Engineering Structures* 6 (1984) 350-356

Wind action on steel chimneys according to standards

Tomasz Lipecki¹, Jarosław Bęc², Paulina Jamińska³

^{1,2,3} *Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: ¹t.lipecki@pollub.pl, ²j.bec@pollub.pl, ³p.jaminska@pollub.pl*

Abstract: Analysis of the steel chimneys response to the wind action has been presented in the paper. The approaches presented in the Polish standards: referring to the steel chimneys [1] and to the wind action [2], as well as in the Eurocode 1 [3] have been shown here. The comparisons of the inline wind action according to these procedures, as well as in the cross-wind directions have been made. The responses to the wind action, i.e. displacements at the top of each chimney, have been compared as well. The real chimneys have been subjected to the analyses. Almost each of them had collapsed, mainly because of the vortex excitation. All chimneys and wind actions have been modelled by FEM system – Autodesk Mechanical Simulation 2013.

Keywords: steel chimneys, wind action, vortex excitation.