



Dr hab. inż. BERNARD WICHTOWSKI, prof. PS
Politechnika Szczecińska
Dr hab. inż. JERZY ANTONI ŻURAŃSKI
Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

PEWNE PRZYPADKI REZONANSU WIATROWEGO KOMINÓW STALOWYCH

SAME CASES OF CROSS WIND VIBRATIONS OF STEEL CHIMNEYS

Streszczenie W referacie, na przykładzie pięciu wolno stojących kominów stalowych, przedstawiono zastosowanie środków zapobiegających drganiom kominów wywołanym odrywaniem się wirów powietrza podczas wiatru. Drgania te, powstające w wyniku tzw. wzbudzenia wirowego, występują w płaszczyźnie prostopadłej do średniej prędkości wiatru i charakteryzują się dużymi amplitudami wierzchołka komina. Omówiono zaobserwowane drgania i zastosowane środki zapobiegawcze, którymi były, z jednym wyjątkiem, turbulizatory spiralne wykonane z okrągłych prętów stalowych o małych średnicach (6 i 8 mm) w porównaniu ze średnicą kominów. Oceniono skuteczność przyjętych rozwiązań.

Abstract The paper deals with the cross wind vibrations of five free standing steel chimneys. Such vibrations arising due to vortex shedding called as vortex excitation, are characterized by large amplitudes of chimney's top. Observed vibrations and preventive measures against them, used for those chimneys, have been presented. With one exception they were spiral helices made with round steel bars of small diameters, 6 and 8 mm, as compared with diameters of chimneys. Effectiveness of such measures is discussed.

1. Wprowadzenie

Stosunkowo częstą przyczyną drgań kominów stalowych pod wpływem wiatru jest wzbudzenie wirowe, naprzemienne odrywanie się wirów Benarda – Karmana od bocznych powierzchni komina. Drgania wywołane wzbudzeniem wirowym występują w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru (zwykle wierzchołek komina zatacza elipsę o dłuższej osi prostopadłej do średniego kierunku wiatru) jako skutek synchronizacji częstotliwości odrywania się wirów f_v z częstotliwością drgań własnych komina f_n . Rozpoczynają się one po osiągnięciu przez wiatr prędkości krytycznej, którą oblicza się ze wzoru

$$v_{kr} = \frac{f_n \cdot D}{St}$$

gdzie: f_n – częstotliwość drgań własnych komina, Hz,
 D – średnica zewnętrzna trzonu komina, m,
 St – liczba Strouhala.

Podczas synchronizacji występuje zjawisko sprzężenia zwrotnego między przepływem powietrza a drgającym kominem. Komin sam zaczyna generować naprzemiennie odrywające się wiry od coraz dłuższego odcinka trzonu, w miarę wzrostu wygięć komina w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru. Zjawisko to zostało omówione m.in. w [1, 2, 3], a obliczanie obciążenia bocznego w [4, 5, 6, 7]. W przypadku kominów stalowych prędkości krytyczne wynoszą najczęściej ok. $5\div 10$ m/s, co oznacza, że każdy komin jest narażony na wystąpienie drgań. Prędkości takie występują często, jednak nie wszystkie kominy drgają. Wynika to z ich właściwości mechanicznych oraz wpływu otoczenia.

Obszerną analizę 64 kominów przedstawił Pritchard w pozycji [8], w literaturze polskiej (z wyjątkiem poz. 7) omawiane są pojedyncze przypadki rezonansu wiatrowego kominów stalowych [9, 10, 11, 12].

Zjawisko rezonansu, z uwagi na częste występowanie krytycznych prędkości wiatru, może spowodować zniszczenie w wyniku zmęczenia konstrukcji, nawet wówczas gdy obciążenie boczne p_y jest mniejsze od obciążenia w linii wiatru p_x . Najczęściej drgania poprzeczne kominów stalowych są likwidowane przez zastosowanie turbulizatorów lub tłumików mechanicznych. Niestety, nie zawsze wybrany sposób jest skuteczny [9, 10, 13, 14]. Dlatego celowa jest praktyczna ocena skuteczności zastosowanych turbulizatorów na obiektach istniejących. Dopiero modele opisujące zjawiska wzbudzenia wirowego zweryfikowane na obiektach w skali naturalnej powinny być wprowadzane do norm projektowania [15, 16].

W referacie, na przykładzie pięciu kominów stalowych, które drgały w wyniku wzbudzenia wirowego, przedstawiono sposoby ich wytłumienia oraz oceniono skuteczność zastosowanego rozwiązania. Podane uwagi i wnioski mogą być przydatne do likwidacji wirowego wzbudzenia drgań podobnych konstrukcji wolno stojących kominów stalowych. Zagadnienie to może być interesujące z powodu małej liczby publikacji weryfikujących praktyczne metody zapobiegania drganiom kominów.

2. Charakterystyka zastosowanych turbulizatorów

Środkami konstrukcyjnymi stosowanymi do redukcji amplitudy drgań powodowanych odrywaniem się wirów są:

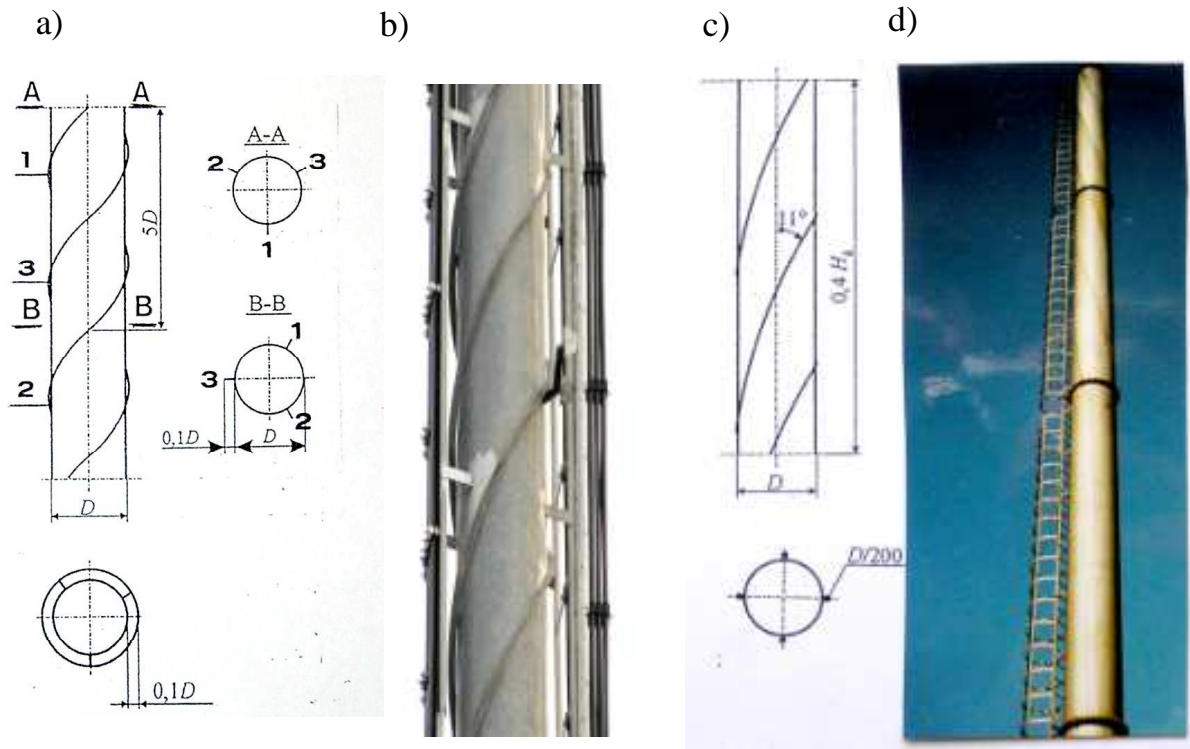
- urządzenia niezależne typu mechanicznego (tłumiki, odciągi),
- urządzenia typu aerodynamicznego (turbulizatory),
- obydwa typy jednocześnie [12, 14, 17].

Pierwszy typ zmienia charakterystykę dynamiczną konstrukcji, a drugi turbulizując opływ nie dopuszcza do powstania wirów Benarda-Karmana. Mechaniczne tłumiki drgań poprzecznych wymagają dokładnego zestrojenia ze sobą elementu tłumiącego z kominem i ciągłego nadzoru. Wielokrotna regulacja rozłożona w długim okresie czasu, zależna od warunków wiatrowych oraz zmiana elementów układu tłumiącego jest niekiedy trudna w wypadku, gdy komin jest w ciągłej eksploatacji.

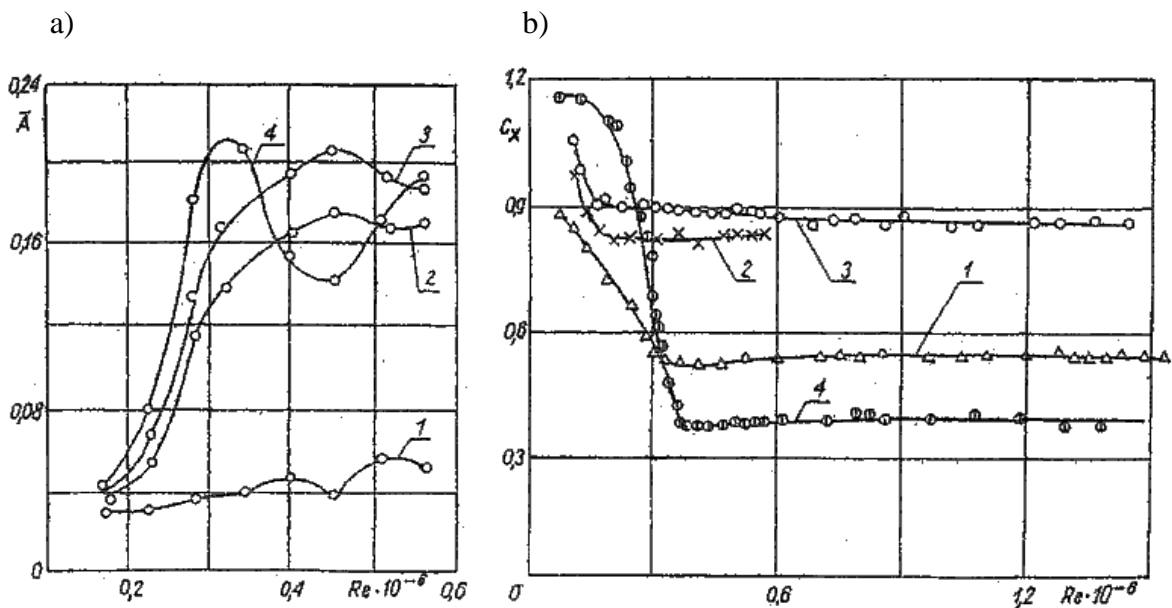
Autorzy referatu preferują drugi typ urządzeń tzn. turbulizatory spiralne z odcinków pierścienia, a w szczególności z prętów okrągłych. Turbulizatory te (rys.1) zostały dokładnie zbadane w tunelach aerodynamicznych [1, 2, 3, 18] i uznaje się je za najbardziej proste i skuteczne.

Bardzo skuteczne są turbulizatory spiralne Scrutona, wykonane w postaci trzech spiral o szerokości $0,1D$ i skoku $5D$, zakładane w górnej części komina o długości równej $0,4$ wysokości (rys.1a). Normy angielskie żądają montażu takich turbulizatorów na wszystkich kominach [18]. Turbulizatory spiralne zwiększają powierzchnię naporu wiatru i współczynnik aerodynamiczny C_x . W obliczeniach należy dla tej części komina, na której są one założone przyjąć współczynnik aerodynamiczny o 100% większy, czyli $C_x = 1,4$.

Najczęściej, z uwagi na prostotę montażu, są stosowane turbulizatory nawinięte spiralnie z czterech drutów okrągłych, najlepiej o średnicy $D/200$ (rys.2a) pod kątem 11° względem tworzącej (rys.1c,d). Ich dodatkową zaletą jest to, że zwiększają współczynnik aerodynamiczny tylko o 35% w stosunku do walca gładkiego (rys.2b), czyli $C_x = 0,7 \cdot 1,35 = 0,95$, a nie 1,4 – jak w przypadku turbulizatora z blach.



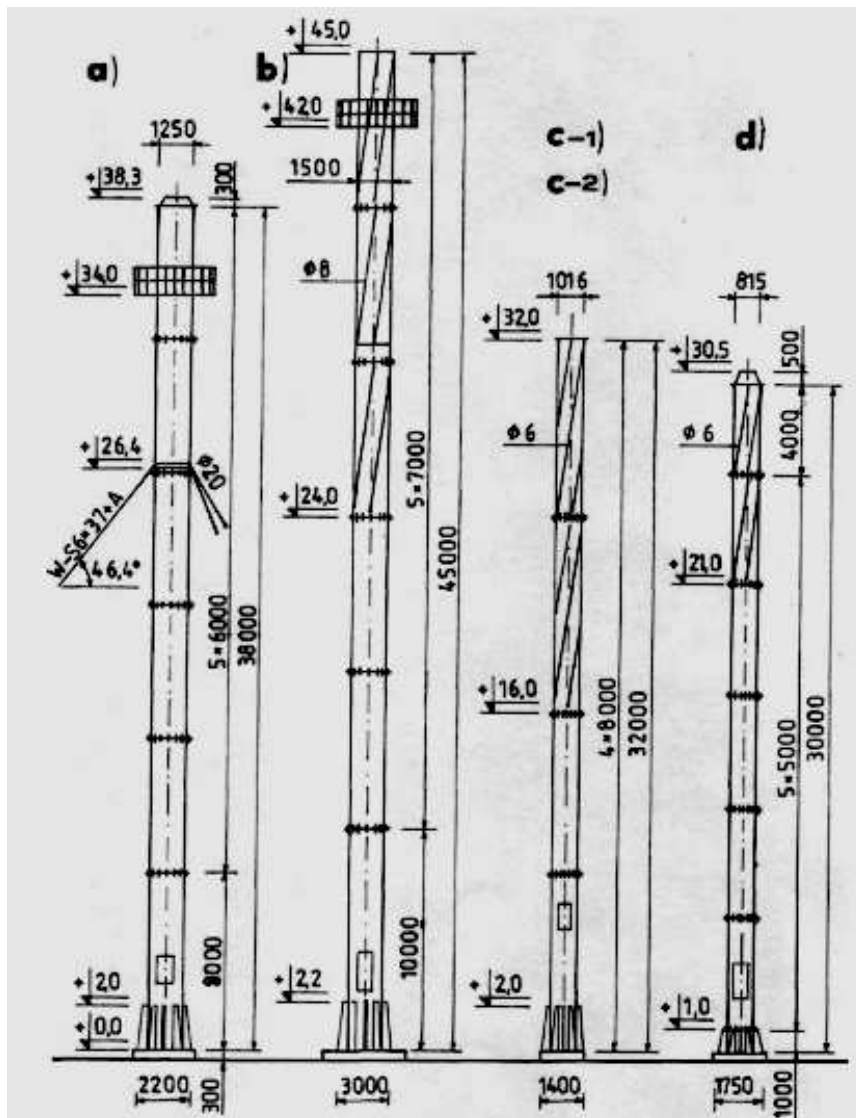
Rys. 1. Turbulizatory: a, b) spiralne potrójne; c, d) z prętów okrągłych



Rys. 2. Wyniki badań modelowych skuteczności turbulizatorów z prętów okrągłych: a) amplituda względna, b) współczynnik oporu aerodynamicznego (1 – $d/D = 1/200$, 2 – $d/D = 1/80$, 3 – $d/D = 1/26$, 4 – bez przerywaczy) [2]

3. Charakterystyka omawianych kominów

Ogólne dane konstrukcyjne omawianych pięciu kominów stalowych wolno stojących przedstawiono na rys. 3 i w tabelicy 1. Są to kominy jednoprzewodowe bez izolacji termicznej o wysokości od 30,5 do 38,3 m, usytuowane w I strefie wiatrowej. Wszystkie kominy mają przewody spalinowe z rur spawanych ze stali niestopowej gatunku St3SY („a”, „b”, „d”) i St3S („c1” i „c2”) o średnicach od 815 do 1500 mm. Kominy odprowadzające spaliny z kotłowni zakładów przemysłowych („a”, „b”) oraz kotłowni dużego szpitala („c1” i „c2”) użytkowane były w sposób ciągły, a komin „d” obsługujący kotłownię rejonową był wykorzystywany sezonowo. Wszystkie kominy wykonano z rurowych segmentów o długościach od 1,0 do 8,0 m, które połączono między sobą kołnierzowo na śruby.



Rys. 3. Konstrukcja omawianych 5 kominów stalowych

Po upływie 4, 6 i 3 lat od zmontowania kominów „a”, „b”, „d” i bezpośrednio po zamontowaniu dwóch bliźniaczych kominów „c1” i „c2” zaobserwowano występowanie drgań o wyraźnie widocznej amplitudzie przemieszczeń poziomych. Zjawisko występowało każdorazowo przy wietrze z kierunku zachodniego, z kierunku przeciwnego do drabin zamontowanych od strony wschodniej. Drgania kominów odbywały się w kierunku prostopadłym do wiatru, a amplituda przemieszczenia wierzchołka komin „a” i „d”, według relacji naocznych

świadców, wynosiła około 80 i 60 cm, natomiast pomierzone amplitudy w kominach „b”, „c1” i „c2” osiągały 95 i 60÷70 cm. Szczególnie długotrwałe wzbudzenie wirowe występowało w kominie „b”, niekiedy przez 15–20 godzin.

Tablica 1. Dane techniczne kominów

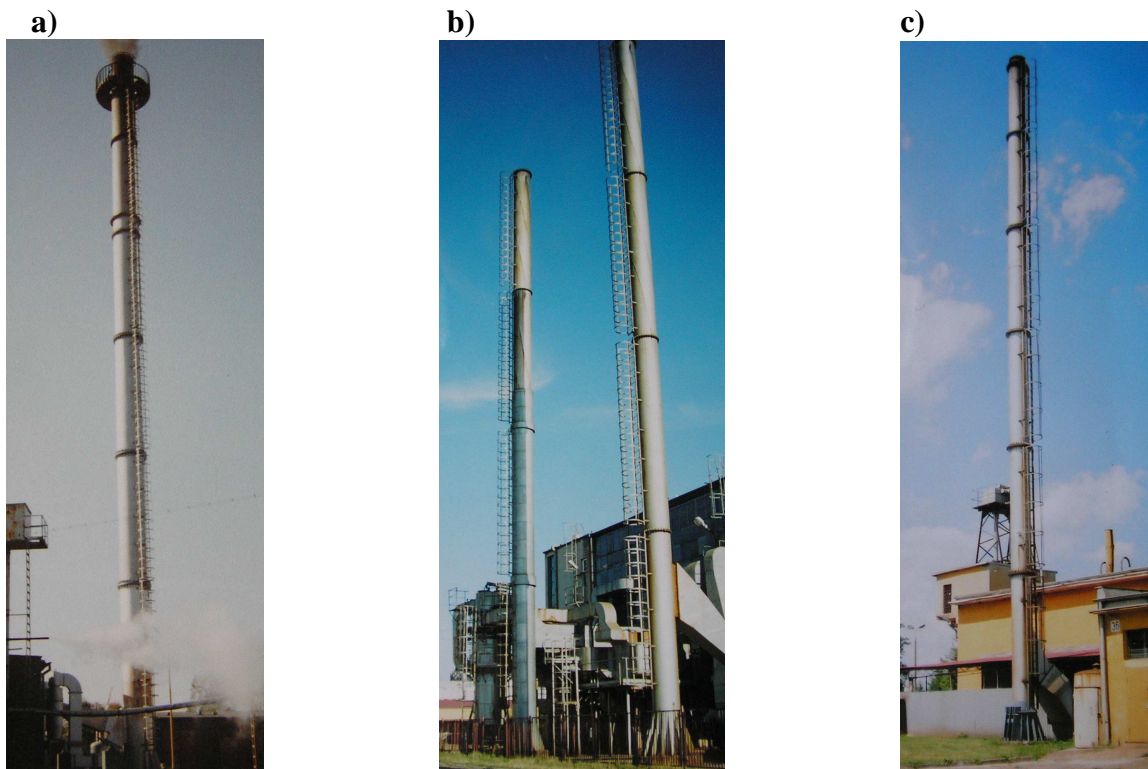
Cecha	Kominy (rys.3)			
	„a”	„b”	„c1”, „c2”	„d”
Wysokość całkowita, H , m	38,3	45,0	32,0	30,5
Średnica, D , m	1,25	1,50	1,016	0,815
Liczba segmentów i projektowa grubość blachy, t , mm	1; $t = 7$ 5; $t = 5$	6; $t = 10$	1; $t = 10$ 3; $t = 8$	2; $t = 10$ 3; $t = 8$ 2; $t = 6$
Poziom czopucha i jego wymiary, m	3,6 0,42 x 1,2	3,5 0,6 x 1,7	5,9 0,5 x 1,3	3,2 0,45 x 1,6
Czas wystąpienia drgań od zmontowania	po 4 latach	po 6 latach	zaraz po zmontowaniu	po 3 latach
Amplituda drgań u wierzchołka komina, A , m	0,80	0,95 ¹⁾	0,70 ¹⁾	0,60
A/D	0,64	0,63	0,69	0,73
Okres drgań własnych, T_1 , s	1,17	1,35	1,00	1,14
Krytyczna prędkość wiatru, V_{cr} , m/s	5,9	6,2	5,6	4,0
Liczba Reynoldsa, $Re/10^5$	4,9	6,2	3,8	2,7
Współczynnik siły bocznej, c_{lat}	0,2	0,2	0,45	0,7
Masa górnej 1/3 wysokości komina, kg/m	170	385	215	135
Liczba Scrutona, Sc	2,1	3,3	4,0	3,9
Środki tłumiące	3 odciagi	turbulizatory oraz MTD ²⁾	turbulizatory prętowe	turbulizatory prętowe
Średnica prętów, mm	–	4 x $\phi 8$ + 4 x $\phi 8$	4 x $\phi 6$	4 x $\phi 6$
Długość odcinka z turbulizatorami, h , m	–	21,0	16,0	9,0
h/H	–	0,46	0,50	0,30
ϕ/D	–	1/188	1/169	1/136
1) Zmierzone za pomocą teodolitu 2) Turbulizatory z 4 prętów $\phi 8$ mm oraz z 8 prętów $\phi 8$ mm okazały się nieskuteczne; drgania wytłumiono za pomocą masowego tłumika drgań (MTD).				

W tablicy 1 obliczenia okresu drgań własnych, liczby Reynoldsa oraz liczby Scrutona wykonano według [15], a wartości współczynnika siły bocznej c_{lat} podano dla kominów bez turbulizatorów. Jednocześnie przyjęto logarytmiczny dekrement tłumienia $\delta_s = 0,012$, a masę drabiny 15 kg/m. W przypadku komina „a” należy dodać masę pomostu, rozłożoną na górny odcinek komina, proporcjonalnie do sił bezwładności. Pominięto też masę połączeń kołnierzych, stąd rzeczywista liczba Scrutona jest więc nieco większa.

4. Likwidacja drgań wywołanych wzbudzeniem wirowym

Likwidację rezonansu wiatrowego kominu „a” dokonano poprzez założenie odciągów liny na poz. +26,4 m. Dano trzy odciągi rozmieszczone co 120° , z lin W – S6×36 +A o średnicy 20 mm. Czynnikiem decydującym o przyjęciu najbardziej pewnego sposobu wytłumienia drgań kominu za pomocą odciągów była jego lokalizacja. Komin był usytuowany w terenie zabudowanym, przy jednej z głównych ulic miasta i w sąsiedztwie budynku przedszkola. Pozostałe cztery kominy wytłumiono za pomocą turbulizatorów prętowych – rys. 3 i 4. Na kominie „b” były to cztery pręty okrągłe o średnicy 8 mm, a na kominie „c1”, „c2” i „d” o średnicy 6 mm, które założono każdorazowo pod kątem $11\div 12^\circ$ względem tworzącej trzonu. Pręty przyspawano do trzonu kominu przemiennie założonymi pachwinowymi spoinami przerywanymi. Były to odcinki spoin o grubości $a = 4$ mm i długości 40 mm, rozmieszczone osiowo w odstępach co 200 mm. Turbulizatory założono na górnych, przywlotowych odcinkach kominu o długościach od 21,0 do 9,0 m – rys. 3 i tabl. 1.

W trzech kominach („c1”, „c2”, „d”) zastosowanie turbulizatorów prętowych było skuteczne i całkowicie zlikwidowało drgania rezonansowe wzbudzone wirami Benarda-Karmana. Nieskutecznym okazało się założenie turbulizatorów z czterech prętów $\phi 8$ mm ($D/188$) na kominie „b” o wysokości $H = 45$ m i średnicy $D = 1,5$ m. Założono, że przyczyną takiego stanu jest znaczna odległość między prętami turbulizatora, która po obwodzie trzonu kominu wynosiła 1177 mm. Założono cztery dodatkowe pręty $\phi 8$ mm, zmniejszając łukową odległość między prętami do 589 mm. Niestety i to rozwiązanie okazało się nieskuteczne. Ostatecznie drgania rezonansowe kominu „b” zlikwidowano za pomocą nowego typu tłumika o masach wiszących*.



Rys. 4. Widok kominów z założonymi turbulizatorami z prętów okrągłych: a) komin „b”, b) kominy „c1” i „c2”, c) komin „d”

* Współautor (BW) dziękuje Panu prof. dr hab. inż. Zbigniewowi Kowalowi za uwagi konstrukcyjne przy projektowaniu tłumika drgań.

5. Podsumowanie

- Wrażliwość wolno stojących kominów stalowych na wzbudzenie wirowe występuje przy odpowiednich warunkach materiałowo – konstrukcyjnych. Charakteryzuje je liczba Scrutona, w przypadku wszystkich omawianych kominów wartości liczby Scrutona były bardzo małe. W przypadku dwóch identycznych kominów „c1” i „c2”, występowanie znacznych drgań poprzecznych stwierdzono bezpośrednio po ich wybudowaniu, a w przypadku trzech pozostałych po pewnym okresie eksploatacji, po zmianie masy konstrukcji na skutek korozji blach płaszcza.
- Trudną do wytłumienia drgań poprzecznych okazała się konstrukcja komina „b” o $H = 45$ i $D = 1,5$ m. Nieskutecznym okazało się założenie turbulizatora z 4 prętów okrągłych $\phi = 8$ mm (1/188) jak również z 8 prętów $\phi = 8$ mm. Analogiczny efekt nieskuteczności turbulizatora linowego stwierdzono w przypadku kominów o podobnych parametrach ($H = 41$ m i $D = 1,45$ m oraz $H = 76,8$ m i $D = 2,9$ m) omówionych w [10, 14].
- Pewne wątpliwości dotyczące skuteczności tłumienia drgań za pomocą turbulizatorów prętowych przedstawiono w [2] przy omawianiu wyników badań pokazanych na rys. 2. Stwierdzono tam, że wyniki badań „budzą pewne wątpliwości. Mianowicie uzyskano je na początku krytycznego zakresu wartości liczby Reynoldsa, gdzie założenie drutów powodowało wcześniejsze przejście warstwy przyściennej laminarnej w turbulentną, a więc znaczne zmniejszenie regularności odrywania się wirów. Poza tym model był stosunkowo krótki ($H/D = 4,8$), co mogło wpływać na wyniki.” Opinię tę potwierdzają obserwacje omawianych kominów. Skuteczne okazały się turbulizatory założone na kominach „c1”, „c2” i „d”, o stosunkowo małych wartościach liczby Reynoldsa, na początku zakresu krytycznego, i wynikających stąd dużych wartościach współczynnika siły bocznej c_{lat} (tabl.1). Turbulizatory przyspieszyły przejście laminarnej warstwy przyściennej w turbulentną i spadek c_{lat} do wartości 0,2. W przypadku pozostałych („a”, „b”) kominów ta wartość wystąpiła bez turbulizatorów, nie były więc one skuteczne.
- Każdy przypadek wzbudzenia wirowego komina należy rozpatrywać indywidualnie, z pełnym rozeznaniem warunków materiałowo – konstrukcyjnych.

Literatura

1. Rykaluk K.: Konstrukcje stalowe – Kominy, wieże, maszty. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
2. Żurański J.A.: Obciążenie wiatrem budowli i konstrukcji. Arkady, Warszawa 1978.
3. Flaga A.: Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania. Arkady, Warszawa 2008.
4. Gaczek M.: Określenie skutków wzbudzenia wirowego kominów stalowych w świetle polskich i europejskich przepisów normalizacyjnych. XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTb, Krynica 1999.
5. Włodarczyk W.: Obciążenie kominów stalowych wzbudzeniem wirowym od wiatru według EN 1991-1-4:2005(E). Proceedings of the XI International Conference Metal Structures, Rzeszów 2006.
6. Włodarczyk W.: Wzbudzenie wirowe drgań według Eurokodu 1 jako oddziaływanie wiatru na kominy stalowe. Inżynieria i Budownictwo, nr 10/2006.
7. Kalabińska J.: Analiza podatności kominów stalowych na wzbudzenie wirowe według ujęć normowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 3/2007.

8. Pritchard B.N.: Steel chimney oscillations: a comparative study of their reported performance versus predictions using existing design techniques. Eng. Structures, nr 6/1984.
9. Cabaj J., Kowal Z.: Rezonans wiatrowy cylindrycznego komina stalowego. Inżynieria i Budownictwo, nr 6/1975.
10. Chlewicki K., Chodor L., Kowal Z., Malec M.: Zabezpieczenie cylindrycznego komina stalowego przed rezonansem wiatrowym. Inżynieria i Budownictwo, nr 2/1989.
11. Gaczek M., Kawecki J.: Drgania poprzeczne kominów stalowych w zmiennych warunkach. IX Międzynarodowa Konferencja Konstrukcje Metalowe. Tom 3, Kraków 1995.
12. Sendkowski J.: Rezonans wiatrowy stalowego komina wolno stojącego. Konferencja „Awarie budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje 1996.
13. Kawecki J., Żurański J.A.: Wirowe wzbudzenie drgań komina stalowego – nowe doświadczenia. L Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB. Tom 2, Krynica 2004.
14. Szymczak C., Jankowski R., Kujawa M.: Stan przedawaryjny wolno stojącego komina stalowego. XLIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB. Tom II, Krynica 2003.
15. PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4. Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
16. PN-93/B-03201 Kominy stalowe. Obliczenia i projektowanie.
17. Kawecki J., Żurański J.A.: Analiza przyczyn kolejnych uszkodzeń komina stalowego. Konferencja „Awarie budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje 2005.
18. Ciesielski R.: Kominy – Poradnik projektanta konstrukcji metalowych. Tom 2., Arkady, Warszawa 1982.