

ZASTOSOWANIE TŁUMIKÓW DRGAŃ POPRZECZNYCH W PRZYPADKU MODERNIZACJI STAŁOWYCH KOMINÓW PRZEMYSŁOWYCH

PAWEŁ PODSTOLAK, *e-mail: pawel.podstolak@buko-projekty.pl*
Biuro Projektowo-Konsultingowe BUKO Sp. z o.o.

MARIUSZ KĘDZIERSKI
Przedsiębiorstwo Budownictwa Przemysłowego EMKA Sp. z o.o. Sp. k.

Streszczenie: Treść referatu obejmuje zagadnienia związane z zabezpieczeniem kominów przemysłowych przed skutkami drgań wywołanych rezonansem wiatrowym i innymi obciążeniami o charakterze dynamicznym. Przypomniano zagadnienia podstawowe związane z rezonansem mechanicznym i zagrożeniami jakie wywołuje to zjawisko dla obiektów budowlanych. Opisano wpływ logarytmicznego dekrementu tłumienia na amplitudy drgań rezonansowych oraz oddziaływania mogące wywoływać zjawiska rezonansowe w odniesieniu do obiektów wysokościowych. Zwrócono uwagę na metodę eliminacji drgań za pomocą masowych tłumików drgań. Podano przykłady 5 kominów o wysokości 25 do 120 m dla których występowały praktyczne problemy związane z nadmiernymi amplitudami drgań. Opisano historie eksploatacji obiektów, obserwowane zjawiska dynamiczne oraz ich skutki. Przedstawiono sposób eliminacji drgań poprzez zastosowanie zaprojektowanych przez autorów masowych tłumików drgań. Zestawiono wyniki pomiarów doświadczalnych uzyskanej skuteczności tłumienia drgań w porównaniu ze stanem przed zabudową tłumików. Zwrócono uwagę na zagadnienia doboru i optymalnej regulacji (strojenia) oraz właściwego serwisowania masowych tłumików drgań.

Słowa kluczowe: kominy stalowe, mechaniczne tłumiki drgań, masowe tłumiki drgań, modernizacja kominów, drgania rezonansowe, wzbudzenie wirowe, wiry Benarda-Karmana, rezonans wiatrowy, rezonans mechaniczny, zmęczenie materiału, logarytmiczny dekrement tłumienia

1. Wstęp

Kominy stalowe są często wykorzystywane jako emitery gazów spalinowych do atmosfery w zakładach przemysłowych oraz ciepłowniach i elektrociepłowniach o małej i średniej mocy. Powszechnie budowane są również stalowe kominy wentylacyjne. Popularność takich konstrukcji wynika z ich dużej konkurencyjności ekonomicznej w porównaniu z kominami żelbetowymi o małej wysokości. Dostępność stali konstrukcyjnych, nowoczesnych technologii wytwarzania oraz żurawi samochodowych o dużym zasięgu i udźwigu spowodowała, że obecnie obiekty o wysokości do 100 m i średnicy zewnętrznej do 4 m budowane są prawie wyłącznie jako stalowe.

Kominy projektuje się obecnie najczęściej jako wolnostojące, głównie z powodu niewielkiej powierzchni zabudowy, łatwości konserwacji oraz szybkości montażu. Ze względu na trwałość często są to kominy o budowie dwupłaszczowej lub wieloprzewodowej, w których przewody wewnętrzne pełnią głównie funkcję technologiczną. Płaszcz zewnętrzny odizolowany od czynników agresywnych stanowi właściwy trzon konstrukcyjny komina przenosząc obciążenie wiatrem oraz ciężar własny i wyposażenia dodatkowego.

Wspornikowy schemat trzonu nośnego w połączeniu ze stosunkowo niewielką masą budowlą i niskim współczynnikiem tłumienia konstrukcyjnego stali powoduje dużą podatność

kominów tego typu na wpływy oddziaływań dynamicznych, a w szczególności wywołanych przez wiatr. Skutkuje to koniecznością stosowania specjalnych zabiegów technicznych zabezpieczających obiekty przed nadmiernymi amplitudami drgań. Jednym z możliwych rozwiązań jest zabudowa tłumików aerodynamicznych takich jak przerywacze spiralne (turbulizatory Scrutona) lub skrzydełkowe, powodujących zakłócenia regularnego odrywania się wirów powietrznych i ograniczające ich niekorzystne oddziaływanie na obiekt. Jak wykazano w pracy [8], tłumiki aerodynamiczne nie zawsze okazują się skuteczne w praktyce, powodując zarazem istotny wzrost obciążenie parciem wiatru na skutek znacznego powiększenia współczynnika oporu aerodynamicznego.

Obecnie coraz częściej do eliminacji drgań kominów stosuje się tłumiki drgań o rozmaitej budowie. Ich działanie polega na wytracaniu energii drgań mechanicznych i nie powoduje istotnego wpływu na pozostałe obciążenia konstrukcji.

2. Zjawisko rezonansu wiatrowego i inne przyczyny drgań kominów stalowych

Powszechnie spotykaną przyczyną występowania nadmiernych drgań konstrukcji budowlanych jest zjawisko rezonansu mechanicznego. Polega ono na przepływie energii pomiędzy dwoma układami drgającymi. Warunkami występowania rezonansu są: zbliżona częstotliwość drgań własnych obydwu układów i ich mechaniczne oddziaływanie. Źródłem wywołującym drgania może być np. pracujące w pobliżu konstrukcji urządzenie mechaniczne lub turbulencje związane z przepływem cieczy i gazów, w tym powietrza atmosferycznego. Drgania może przenosić podłoże gruntowe lub elementy konstrukcyjne łączące obydwa układy. Efekt rezonansu, a więc amplituda drgań, istotnie zależy od współczynnika tłumienia drgań przez konstrukcję, co obrazują wzory (1) opisujące zachowanie tłumionego oscylatora harmonicznego z siłą wymuszającą. Z zależności (1b) stanowiącej przybliżenie (1a) dla małych wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia (LDT) wynika, że przy nieziennej sile wymuszającej, amplituda drgań zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do wartości LDT.

$$A_{\max} = \frac{\pi \cdot F_o}{K \cdot \left(\delta - \frac{\delta^3}{\delta^2 + 4\pi^2} \right)} \quad (1a) \qquad A_{\max} \approx \frac{\pi \cdot F_o}{K \cdot \delta} \quad (1b)$$

gdzie: $A_{\max}$ – maksymalna wartość amplitudy drgań przy wymuszeniu rezonansowym; F_o – amplituda siły wzbudzającej; K – sztywność (modalna) układu drgającego, δ – logarytmiczny dekrement tłumienia drgań.

Omówione powyżej właściwości stalowych kominów wolnostojących powodują, że są one silnie narażone na niekorzystne skutki drgań rezonansowych. Nawet stosunkowo niewielkie amplitudy drgań występujących przez długi okres czasu mogą wywoływać zjawisko wysokocyklowego zmęczenia materiału. Przy większych amplitudach możliwe jest także przekroczenie stanu użyteczności obiektu budowlanego lub nawet stanu granicznej nośności. Przykłady obiektów budowlanych uszkodzonych lub zniszczonych przez działania dynamiczne przedstawiono m.in. w pracy [8].

Szczególnie częstą przyczyną występowania niebezpiecznego rezonansu są wiry Benarda-Karmana. Jest to zjawisko naprzemiennego odrywania się strug (wirów) powietrza opływającego trzon komina, mający z reguły przekrój kołowy. Efektem ich działania jest powstawanie sił poziomych działających poprzecznie w stosunku do kierunku wiatru. Siły te pomimo, że posiadają stosunkowo niewielką amplitudę, działają synchronicznie z drganiami samego komina wywołując zjawisko rezonansu.



Rys. 1. Ścieżka wirowa Benarda-Karmana

W przypadku gdy komin podatny jest na wzbudzenie wirowe, tzn. zachodzi warunek (2) wg [1] zał. E, konieczna jest ocena bezpieczeństwa konstrukcji ze względu na wysokocyklowe zmęczenie materiału.

$$v_{crit,i} \leq 1,25 v_m \quad (2)$$

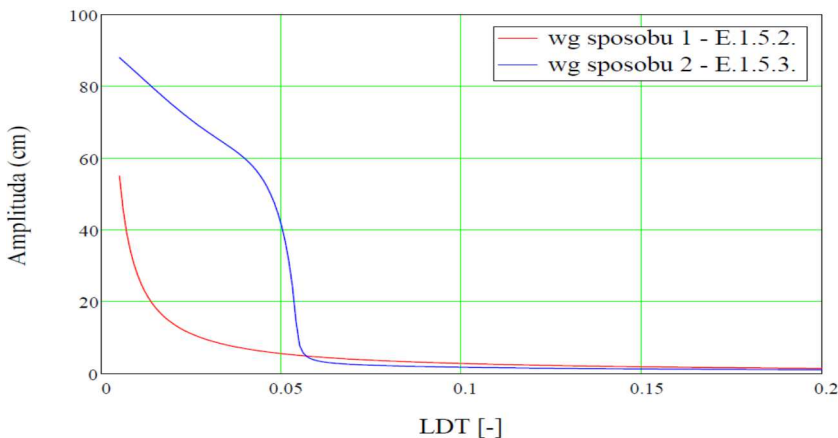
gdzie: $v_{crit,i}$ – prędkość krytyczna wiatru dla i-tej postaci drgań; v_m – średnia 10 minutowa wartość charakterystyczna prędkości wiatru.

Krytyczna prędkość wiatru może znajdować się w zakresie wartości często występujących, co powoduje, że w przewidywanym okresie eksploatacji obiektu (20–30 lat) z powodu dużej liczby cykli, zmęczenie materiału ma istotne znaczenie. Sprawdzenie nośności ze względu na zmęczenie należy wykonywać wg normy [3], z uwzględnieniem dodatkowych zaleceń podanych w [2] p. 9. Obciążenie komina oddziaływaniem wirowym wiatru przyjmuje się wg [1], jako działające z częstotliwością drgań własnych konstrukcji i wywołujące określone, wyznaczane wg normy przemieszczenie wierzchołka komina. Dla budowli wolnostojących (wspornikowych), drgających z pierwszą postacią drgań wymagana jest metoda 2 wyznaczania amplitudy drgań podana w [1] p. E.1.5.3. W pozostałych przypadkach stosuje się metodę 1 wg p. E.1.5.2. Dla określonego obciążenia należy wyznaczyć zakres zmienności naprężeń dla niewrażliwych miejsc konstrukcji i dokonać weryfikacji warunków wytrzymałości zmęczeniowej. Potrzebną do obliczeń wartość liczby cykli obciążenia wyznacza się wg wzoru E.10 normy [1]. Z racji tego, że wytrzymałość zmęczeniowa nie zależy od gatunku stali użytej do budowy konstrukcji, redukcję stopnia wytężenia zmęczeniowego można osiągnąć w sposób efektywny właściwie tylko poprzez ograniczenie amplitudy drgań. Teoretycznie możliwy jest wpływ na amplitudę drgań poprzez zmianę sztywności konstrukcji a zarazem częstotliwości drgań własnych i prędkości krytycznej wiatru. Jest to jednak metoda mało efektywna i nieekonomiczna, chyba że prowadzi do wyjścia poza zakres obowiązywania warunku (2). Dla wzbudzenia wirowego parametrem opisującym podatność konstrukcji na drgania wywołane tym zjawiskiem jest liczba Scrutona. Jest ona definiowana w sposób następujący:

$$S_c = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{ie}}{\rho \cdot b^2} \quad (3)$$

gdzie: δ_s – logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcyjnego; m_{ie} – masa równoważna konstrukcji na jednostkę długości i-tej postaci drgań; ρ – gęstość powietrza (1,25 kg/m³); b – szerokość odniesienia przekroju poprzecznego (średnica komina).

Analizując postać wzoru E.7 podanego w normie [1] określającego największe przemieszczenie konstrukcji wywołane rezonansem wiatrowym dochodzimy do wniosku, że zwiększenie liczby Scrutona efektywnie wpływa na ograniczenie amplitudy drgań, gdyż występuje ona w mianowniku tego wyrażenia. Podobna zależność wynika również z wzorów podanych w p. E.1.5.3 dla alternatywnej metody obliczania przemieszczeń. Ze względów praktycznych podniesienie wartości liczby Scrutona możemy uzyskać najprościej zwiększając logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcji. Jak przedstawiono na rys. 2 amplituda drgań szybko spada wraz ze wzrostem wartości LDT.



Rys. 2. Przykładowa zależność amplitudy drgań konstrukcji od wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia LDT dla obydwu sposobów podanych w normie [1]

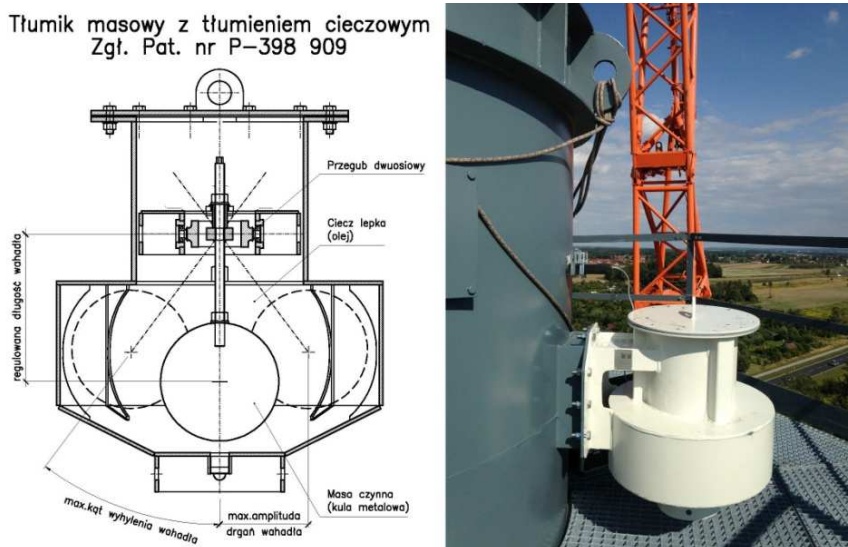
W prezentowanym przypadku zwłaszcza metoda 2 (wykres niebieski) wykazuje silną wrażliwość na wartość LDT. Jest to wynikiem wpływu tłumienia zarówno na skutek rezonansu, jak i na wartość siły która go wywołuje. Taki efekt silnego spadku amplitud drgań po przekroczeniu pewnej wartości LDT obserwowany jest w rzeczywistości.

Wartość LDT konstrukcyjnego przyjmowane do obliczeń dla konstrukcji stalowych podano w tabl. F.2 normy [1]. Parametr ten waha się dla kominów stalowych w granicach 0,012 do 0,07. Tak małe tłumienie w połączeniu ze stosunkowo niewielką masą konstrukcji powodują, że komin-y stalowe pozbawione dodatkowych zabezpieczeń wykazują zwykle wysoką podatność na zjawisko wzbudzenia wirowego. W ekstremalnych przypadkach oddziaływanie to może być na tyle duże, że doprowadzi do natychmiastowego zniszczenia konstrukcji poprzez wyczerpanie jej nośności. Zwykle jednak objawia się drganiami o umiarkowanej amplitudzie, które jednak poprzez długotrwałe występowanie prowadzą do powstawania uszkodzeń zmęczeniowych konstrukcji.

Zjawisko drgań rezonansowych i związane z nimi zmęczenie materiału bywa często niedoceniane przez projektantów i użytkowników obiektów budowlanych. Komin-y stalowe, zwłaszcza te projektowane przed wprowadzeniem norm europejskich, często nie posiadają żadnych zabezpieczeń przed drganiami wiatrowymi lub są one nieskuteczne. Z powodu niewielkich wymagań odnośnie do stanów granicznych użyteczności kominów drgania takich obiektów są często bagatelizowane przez użytkowników. Nawet widoczne gołym okiem ruchy poprzeczne trzonu nie powodują problemów z funkcjonowaniem instalacji technicznych zakładu i nie są wystarczającym powodem do podjęcia kroków zaradczych. Taki stan rzeczy trwający wiele lat doprowadza do uszkodzeń konstrukcji i może skutkować katastrofą obiektu w czasie silnych wiatrów.

3. Stosowane rozwiązania tłumików drgań

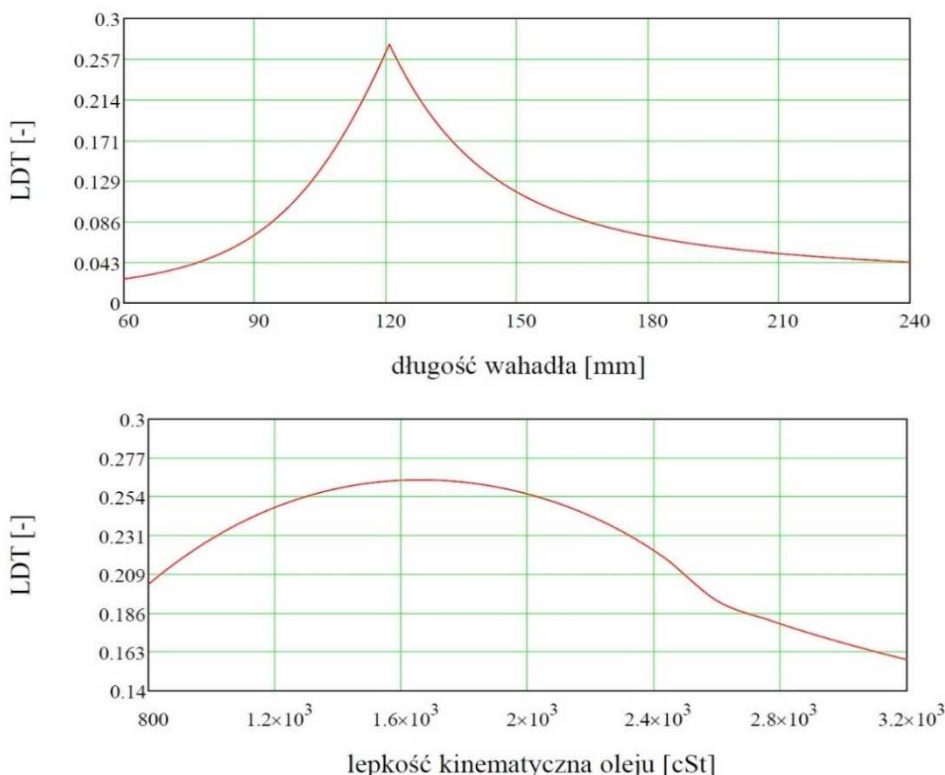
Jak wynika z powyższych rozważań podniesienie wartości współczynnika tłumienia drgań przez konstrukcję jest jednym z najskuteczniejszych sposobów ograniczenia i eliminacji drgań ustrojów budowlanych. Dobrym sposobem na osiągnięcie tego efektu jest zastosowanie tłumików drgań. Przykłady budowy i działania takich urządzeń oraz podstawy teoretyczne ich projektowania i doboru przedstawiono w publikacji [5]. W przypadku obiektów wysokich, jakimi są kominy, najprostsze i najbardziej ekonomiczne okazuje się zastosowanie masowych tłumików drgań. Na rynku spotyka się wiele takich rozwiązań [10], a ich koszty są niewielkie w stosunku do wartości zabezpieczanych obiektów budowlanych. Urządzenia tego typu składają się z dodatkowej masy dołączonej do konstrukcji komina za pomocą więzów o właściwościach sprężystych i tłumiących.



Rys. 3. Przykładowy tłumik drgań firmy EMKA – masowy z tłumieniem cieczowym [13]

Tłumienie drgań następuje dzięki przepływowi energii mechanicznej (zjawisko rezonansu) z konstrukcji do masy dodatkowej oraz jej wytracaniu w więzach tłumiących. Rolę więzów tłumiących pełnić może np. ciecz lepka, w której zanurzona jest masa drgająca (rys. 3), specjalnie skonstruowane amortyzatory cieczowe gazowe lub cierne. Zasada działania stosowanych równie często tłumików cieczowych jest analogiczna. Masą dodatkową jest w tym przypadku falująca w naczyniu ciecz, a wytracanie energii następuje na skutek przepływu medium przez otwory w przegrodach. Prawdłowa i efektywna praca masowego tłumika drgań możliwa jest jedynie w przypadku optymalnego doboru charakterystyk jego więzów dla tłumionej częstotliwości drgań obiektu budowlanego. W przypadku tłumików wahadłowych parametrem odpowiadającym sztywności więzów sprężystych, a więc wpływającym na częstotliwość drgań, jest długość wahadła a charakterystyka tłumiących zależy np. od lepkości oleju w którym zanurzona jest masa drgająca. Na rys. 4 przedstawiono przykładowe, sporządzone przez autorów wykresy ilustrujący wpływ sztywności więzów (długości wahadła) i doboru parametru tłumienia (lepkość oleju tłumiącego) na skuteczność działania tłumika wahadłowego. Zależności te wynikają z analizy modelu obliczeniowego tłumika drgań tego typu. Jak widać szczególnie istotny wpływ na skuteczność działania tłumika ma precyzyjny dobór parametru

szttywności (długości wahadła) a więc jego optymalne dostrojenie. Znaczenie parametru odpowiedzialnego za tłumienie wewnętrzne jest mniejsze ale również istotne.



Rys. 4. Wpływ doboru parametrów sztywności więzów tłumika (długości wahadła) i tłumienia wewnętrznego (lepkości oleju tłumiącego) na jego skuteczność.

Okres drgań tłumików cieczowych reguluje się wstępnie poprzez odpowiedni dobór rozmiarów naczynia, precyzyjne strojenie odbywa się natomiast za pomocą zmiany poziomu cieczy.

Z przytoczonych rozważań wynika, że konstrukcja tłumika drgań, musi zostać odpowiednio dopasowana do rzeczywistych charakterystyk dynamicznych obiektu budowlanego. W praktyce konieczne jest zapewnienie możliwości regulacji sztywności więzów czyli tzw. strojenie tłumika, które wykonywane jest po jego zabudowie na obiekcie. Szczególnie prosto strojenie przebiega w przypadku tłumików wahadłowych, gdzie regulacja dokonywana jest przez zmianę długości wahadła.

4. Przykłady modernizacji kominów połączonej z ochroną ich konstrukcji przed drganiami rezonansowymi

Podczas modernizacji kominów stalowych zachodzi potrzeba ich dostosowania do aktualnych przepisów i wymagań obowiązujących norm europejskich. Przeprowadzenie obliczeń sprawdzających często ujawnia kłopoty ze spełnieniem warunków wytrzymałości zmęczeniowej, wywołane zazwyczaj przez rezonans wiatrowy. W tym przypadku najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem staje się zabudowa tłumików drgań ograniczających to niekorzystne zjawisko do bezpiecznego poziomu. Poniżej przedstawiono kilka przykładów takich realizacji.

Dla każdego przypadku przeprowadzono pomiary weryfikujące uzyskaną skuteczność tłumienia i wyznaczono amplitudy drgań dla wartości LDT przed i po zabudowie tłumików. Dla pomierzonych wartości LDT wyznaczono obliczeniowo amplitudy drgań rezonansowych (wg [1] metoda 2 p. E.1.5.3). Metodologię wykonania pomiarów i zestawienie wyników szczegółowych podano w p. 5.



Rys. 5. Modernizowane kominy o konstrukcji wspornikowej $H = 45, 50$ i 25 m

Odbudowa komina stalowego $H = 45$ m po katastrofie budowlanej

Komin wolnostojący, jednopłaszczowy o wysokości $H = 45$ m i średnicy wylotu $D = 1,7$ m, eksploatowany ok. 10 lat w małej ciepłowni na zachodzie Polski uległ katastrofie podczas wichury w grudniu 2013 r. Obaleniu uległa część komina ponad przewężeniem na wysokości 8 m. Złamanie nastąpiło w miejscu spawu ponad połączeniem kołnierzowym. Wykonana przez nas analiza obliczeniowa wykazała znaczne przekroczenie warunku wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji. Największe wahania wartości naprężeń występowały w strefie zniszczenia co wskazuje na rezonans wiatrowy i zmęczenie materiału jako najbardziej prawdopodobną przyczynę awarii. Obiekt przed katastrofą wyposażono w turbulizatory spiralne, których skuteczność okazała się jednak niewystarczająca. Początkowo niewielkie pęknięcia w obrębie spawu nie zostały zauważone co praktycznie uniemożliwiła zewnętrzna izolacja termiczna trzonu. Silny wiatr podczas wichury dopełnił tylko dzieła zniszczenia. Szczęśliwie górny odcinek komina upadając na pusty plac składowy nie wyrządził praktycznie żadnych szkód materialnych.

Zniszczoną część komina odbudowano jako konstrukcję dwupłaszczową. Charakterystyki dynamiczne i aerodynamiczne komina nie uległy przy tym zasadniczym zmianom i obiekt wymagał w dalszym ciągu wykonania skutecznego zabezpieczenia przed skutkami drgań. Zdecydowano się na zabudowę zestawu 3 tłumików masowych, wahadłowych własnej konstrukcji. Masa czynna tłumików wynosiła łącznie ok. 100 kg co stanowi ok. 0,85% masy modalnej dla pierwszej postaci drgań komina. Zastosowane tłumiki pozwoliły na kilkukrotną redukcję obliczeniowej amplitudy drgań obiektu a zarazem ograniczenie amplitudy zmienności naprężeń do bezpiecznego poziomu.

Zabezpieczenie kominu $H = 50$ m przed nadmiernymi drganiami

Komin wspornikowy, jednopowłokowy o wysokości $H = 50$ m i średnicy wylotu $D = 2,2$ m, eksploatowany od kilkunastu lat w małej Ciepłowni na południu Polski został poddany w roku 2016 okresowemu przeglądowi i ocenie stanu technicznego. W wyniku pomiarów grubości ścianki trzonu stwierdzono lokalnie ubytki korozyjne zlokalizowane na poziomie dolnej galerii obsługowej (poz. ok. 27 m). Przyczyną powstania korozji było lokalne wychładzanie ścianki trzonu przez źle zaizolowane kołnierze usztywniające galerii. Pomierzone lokalne ubytki korozyjne na tym poziomie dochodziły do 40% pierwotnej grubości ścianki. Wykonana w ramach oceny stanu technicznego analiza obliczeniowa wykazała przekroczenie kryterium nośności zmęczeniowej na skutek występowania zjawiska wzbudzenia wirowego. Wywiad z pracownikami zakładu potwierdził, wielokrotne obserwacje drgań kominu widocznych gołym okiem. Największe wyężenia występowały w strefie dużych ubytków korozyjnych +27 m oraz nad poziomem redukcji średnicy trzonu +20 m. Z racji tego, że przewidywany okres eksploatacji obiektu dobiega końca i wynosić będzie jeszcze ok. 2 lat zdecydowano się na ograniczenie zakresu modernizacji do niezbędnego minimum. W ramach prac naprawczych wykonano:

- lokalne wzmocnienie trzonu w miejscu największego osłabienia (poz. +27 m),
- dodatkową izolację pierścieni dolnej galerii aby zahamować zjawisko dalszej korozji tego przekroju,
- zabudowę systemu 3 tłumików masowych, wahadłowych własnej konstrukcji o łącznej masie czynnej 300 kg (ok. 2,7% masy modalnej).

Takie zabiegi spowodowały około 30-krotną redukcję obliczeniowej amplitudy drgań i spełnienie warunku wytrzymałości zmęczeniowej z dużym zapasem. Zachowanie dużej rezerwy bezpieczeństwa było konieczne ze względu na zaistniałe już zmęczenie konstrukcji kominu. Przy projektowaniu tłumików drgań kierowano się możliwością ich zabudowy w przyszłości na nowym kominie o podobnej wielkości, którego budowa planowana jest na miejscu obiektu istniejącego. Nieznajomość dokładnych cech dynamicznych nowego kominu wymagała wykonania tłumików o większej masie czynnej i większym niż zazwyczaj stosowany zakresie regulacji.

Wymiana zużytego kominu stalowego $H = 25$ m z dostosowaniem do aktualnych wymogów normowych

Komin wolnostojący, jednopowłokowy, nieizolowany o wysokości $H = 25$ m i średnicy $D = 0,6$ m uległ naturalnemu zużyciu korozyjnemu po kilkunastoletniej eksploatacji w małej kotłowni przyzakładowej na południu Polski. Zdecydowano o odtworzeniu konstrukcji w niezmienionym kształcie. Wykonane obliczenia sprawdzające wykazały znaczną podatność obiektu na wzbudzenie wirowe i istotne przekroczenie warunku wytrzymałości zmęczeniowej w poziomie podstawy. Rzeczywiste występowanie widocznych gołym okiem drgań starego obiektu potwierdzili także pracownicy zakładu. Postanowiono zatem zabudować na obiekcie tłumik masowy, wahadłowy, własnej konstrukcji o masie czynnej 24 kg (ok. 1,7% masy modalnej). Pozwoliło to na przeszło 60-krotną redukcję obliczeniowej amplitudy drgań wywołanych rezonansem wiatrowym.

Modernizacja systemu tłumienia 2 kominów stalowych $H = 120$ m po awarii tłumika drgań na jednym z obiektów

Jedną z ciekawszych realizacji wykonanych przez autorów referatu była modernizacja tłumików drgań na dwóch bliźniaczych kominach stalowych o wysokości $H = 120$ m wzniesionych w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku w zakładzie przemysłowym na południu

Polski. Obiekty mają nietypowy układ konstrukcyjny. Rurowy trzon nośny o średnicy 1820 mm podparto dwoma zastrzałami z rur $\phi 1016$ mm. Zastrzały rozstawiono w rzucie poziomym pod kątem 60° i stężono do trzonu konstrukcjami pomostów obsługowych na 8 poziomach. Wewnątrz obrysu trzonu poprowadzono przewód kominowy o średnicy ok. 1800 mm podparty do niego pionowo-przesuwnie. Taki schemat konstrukcyjny powoduje mocno anizotropowe właściwości dynamiczne obiektów. Wykonane przez autorów pomiary dynamiczne, wykazały znaczne zróżnicowanie charakterystyk dynamicznych dla obydwu wzajemnie prostopadłych kierunków drgań. Konstrukcja kominów pomimo usztywnienia dodatkowymi podporami okazała się podatna na zjawisko wzbudzenia wirowego co potwierdziły praktyczne obserwacje. Wyznaczona obliczeniowo prędkość krytyczna wiatru [11], dla której efekt ten występuje, wynosi ok. 6,3 m/s, a więc odpowiada prędkości wiatru występującej stosunkowo często.



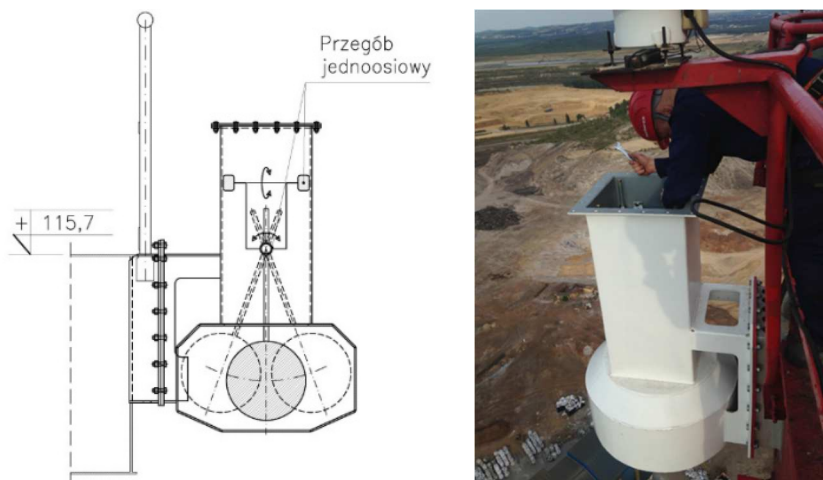
Rys. 6. Jeden z kominów $H = 120$ m: Widok ogólny, awaria tłumika balastowego, nowe tłumiki drgań

W projekcie kominów przewidziano zastosowanie tzw. turbulizatorów spiralnych, co świadczy, że spodziewano się możliwości wystąpienia zjawiska rezonansu wiatrowego. Projektowanych zabezpieczeń jednak z niewiadomych przyczyn nie wykonano. W niedługim czasie po wzniesieniu kominów, ujawniły się bardzo duże drgania poprzeczne w kierunku mniejszej sztywności konstrukcji. Z relacji naocznych świadków wynika, że wyraźnie odczuwalne były pionowe przemieszczenia fundamentów pod zastrzałami, a ruchy podłoża przenosiły się na sąsiednie budynki. Próbą rozwiązania tego problemu było wykonanie na jednym z kominów przerywaczy strug powietrza (aerodynamicznych tłumików drgań), zaburzających odrywanie się wirów wiatrowych, co tylko ograniczyło intensywność zjawiska.

Pożądany skutek przyniosła dopiero zabudowa na obydwu kominach masowych tłumików drgań o konstrukcji opisanej w publikacji [11]. Obciążnik o masie około 2 t umiejscowiono pomiędzy trzonem i przewodem kominowym, podwieszając go na pojedynczej linii stalowej do górnego pomostu obsługowego. Rozpraszanie energii drgań i dodatkowe podparcie sprężyste zrealizowano poprzez 4 pary pęt z linek stalowych łączących masę drgającą z konstrukcją komina. Praktyka wykazała, że rozwiązanie to, mimo że skuteczne, okazało się bardzo kłopotliwe w eksploatacji. Ciągłe ruchy masy czynnej powodowały zmęczenie i pękanie drutów w pętach linowych, co zmieniało charakterystyki tłumików, wpływając na obniżenie ich skuteczności. Urządzenia wymagały więc częstej kontroli i okresowej wymiany linek oraz

regularnego strojenia, co było bardzo kłopotliwe. Stopniowemu zużyciu ulegała również lina nośna, która przeginała się cyklicznie wewnątrz obciążnika.

Na wiosnę 2015 roku z opisanych powyżej powodów doszło do zerwania liny nośnej balastu tłumika na jednym z kominów. Obciążnik upadł na niżej położony pomost obsługowy. Komin pozbawiony całkowicie tłumienia ponownie wpadł w niebezpieczne drgania zaobserwowane i zgłoszone przez pracowników zakładu. Według relacji świadków, drgania miały amplitudę kilkudziesięciu centymetrów. Po zdiagnozowaniu przyczyny awarii wymieniono niezwłocznie ciężna nośne i pęta linowe tłumików na obydwu kominach. Autorzy referatu wykonujący prace naprawcze zwrócili uwagę na realne zagrożenie ponownego wystąpienia w przyszłości podobnej awarii i zalecili użytkownikowi obiektów modernizację istniejącego systemu tłumików drgań.



Rys. 7. Tłumiki drgań zastosowane na kominie H = 120 m: schemat, widok podczas regulacji

Podjęto decyzję o wykonaniu nowego systemu tłumików drgań optymalnie zaprojektowanego do nietypowych wymagań występujących w tym przypadku. Specyficzna (omówiona powyżej) konstrukcja kominów wykluczała niektóre z powszechnie stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Nowe tłumiki musiały zapewniać m. in.: wysoką niezawodność i skuteczność działania, optymalne dostosowanie do anizotropowej charakterystyki dynamicznej obiektów, a przy tym być stosunkowo małe i lekkie, tak aby nie zwiększać nadmiernie obciążeń konstrukcji oraz umożliwiać zabudowę bez użycia ciężkiego sprzętu budowlanego (bardzo duża wysokość kominów). Wymagania te spełniło rozwiązanie skonstruowane i od kilku lat stosowane przez autorów niniejszego referatu.

Dla każdego kominu przewidziano 3 niezależne tłumiki, co zredukowało gabaryty urządzeń gwarantując zarazem bardzo wysoką niezawodność, łatwy montaż i równomierne obciążenie konstrukcji. Specjalna budowa łożyskowanych przegubów wahadeł o osiach przesuniętych w pionie umożliwiła dopasowanie do rzeczywistych częstotliwości drgań obiektu w każdym z kierunków głównych, a płynny zakres regulacji pozwolił na precyzyjne dostrojenie urządzeń do zmieniających się w czasie charakterystyk obiektu. Masa czynna tłumików dla każdego z kominów wynosiła 600 kg co stanowi ok. 1,8% masy modalnej dla dwóch podstawowych postaci drgań. Osiągnięty efekt tłumienia ($LDT = 0,34$) przewyższył skuteczność starych urządzeń tłumiących dla których pomierzona przez autorów wartość LDT wykazywała bardzo duże rozbieżności poszczególnych wyników pomiaru (0,04–0,19) [12].

5. Wyniki pomiarów skuteczności zastosowanych tłumików drgań

Dla każdego z kominów opisanych w p. 4 przeprowadzono pomiary logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań. Obserwacje wykonywano dla stanu z zablokowanymi urządzeniami tłumiącymi oraz po ich uruchomieniu i optymalnym dostrojeniu. Określenie wartości LDT wykonywano zgodnie z wymaganiami [4] analizując przebiegi czasowe przyspieszenia drgań zarejestrowanych za pomocą czujnika akcelerometrycznego zainstalowanego na szczycie komina. Wzbudzenia drgań dokonywano poprzez synchroniczne ruchy jednej lub kilku osób znajdujących się na galerii górnej komina w płaszczyznach odpowiadających kierunkom pomiarowym. Rejestrację przeprowadzano dla drgań swobodnych po ustaniu wzbudzenia. Dla każdego kierunku drgań wykonano po kilka niezależnych pomiarów. Poszukiwany parametr dla zarejestrowanych przebiegów drgań wyznaczono poprzez optymalne dopasowanie krzywej drgań gasnących do zarejestrowanych punktów pomiarowych. Dopasowanie wykonywano przy pomocy metody najmniejszych kwadratów. Wyniki zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie wyników pomiarów logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań

Lp.	Komin	Kierunek drgań	Tłumiki nieczynne		Tłumiki czynne		Wskaźnik poprawy skuteczności tłumienia [-]	Wskaźnik redukcji amplitudy drgań [-]
			LTD [-] wg pomiaru	Amplituda drgań [cm] ¹⁾	LTD [-] wg pomiaru	Amplituda drgań [cm] ¹⁾		
1	H = 45 m	średnio X i Y	0,035	13,0	0,16	2,0	4,6	6,5
2	H = 50 m	średnio X i Y	0,020	110,2	0,20	3,7	10,0	29,8
3	H = 25 m	średnio X i Y	0,015	25,2	0,15	0,4	10,0	63,0
4	H = 120 m ²⁾	X	0,030	-	0,35	-	11,7	-
		Y	0,015	-	0,34	-	22,7	-

¹⁾ Amplituda drgań wyznaczona wg metody 2 p. E.1.5.3, ²⁾ Wyniki dla jednego z obiektów H = 120 m

6. Podsumowanie

Modernizacja każdego obiektu budowanego w tym również komina powinna wiązać się z jego dostosowaniem do aktualnych wymagań normowych, prawnych i standardów bezpieczeństwa. Bardzo często konieczne staje się ograniczenie nadmiernych amplitud drgań konstrukcji. Jak wykazano bardzo skutecznym sposobem eliminacji drgań rezonansowych jest zastosowanie masowych tłumików drgań. Dobrze zaprojektowane i dostrojone urządzenie tego typu umożliwia kilku, a nawet kilkunastokrotne podniesienie wartości LDT dla komina stalowego. Wpływa to na zdecydowane ograniczenie amplitudy drgań i skutecznie zabezpiecza obiekt przed niekorzystnymi skutkami wzbudzenia wirowego oraz innych drgań rezonansowych. Warto podkreślić, że optymalnie dobrane tłumiki drgań nie wpływają na znaczące zwiększenie innych obciążeń konstrukcji, a w szczególności obciążenia parciem wiatru, jak to się dzieje w przypadku zastosowania aerodynamicznych eliminatorów drgań. Wręcz przeciwnie ich poprawne działanie może zredukować dynamiczny efekt porywów wiatru co przedstawiono w pracy [6]. Stosując tłumiki drgań należy pamiętać, że są to urządzenia mające kluczowy wpływ na bezpieczeństwo budowli. Ich awaria prowadzić może do niekontrolowanego wzbudzenia drgań o dużej amplitudzie prowadzących do poważnych uszkodzeń konstrukcji a nawet do jej zniszczenia. Dlatego też urządzenia tłumiące powinny być odpowiednio zaprojektowane i dostrojone do charakterystyk dynamicznych chronionego obiektu a podczas eksploatacji poddawane regularnej kontroli serwisowej.

Literatura

1. PN-EN 1991-1-4 EUROKOD 1; Oddziaływania na konstrukcje Część 1-4: Oddziaływania ogólne, Oddziaływanie wiatru.
2. PN-EN 1993-3-2 EUROKOD 3; Projektowanie konstrukcji stalowych Część 3-2: Wieże, maszty i kominy – Kominy.
3. PN-EN 1993-1-9 EUROKOD 3; Projektowanie konstrukcji stalowych Część 1-9: Zmęczenie.
4. ISO 4866:2010. Mechanical vibration and shock – Vibration of fixed structures – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures.
5. Lewandowski R.: Redukcja drgań konstrukcji budowlanych, PWN, Warszawa 2014.
6. Lewandowski R, Kaczor A., Okupniak B. Drgania stochastyczne ram płaskich z zainstalowanymi tłumikami drgań.
7. Dulińska B., Kawecki J. Awarie i katastrofy budowli wywołane działaniami dynamicznymi. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie budowlane”. Szczecin-Międzyzdroje 2011.
8. Wichtowski B., Żurański J. A.; Pewne przypadki rezonansu wiatrowego kominów stalowych. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje 2009.
9. Włodarczyk W. Problemy projektowania kominów stalowych z uwzględnieniem Eurokodów. XXVII Ogólnopolskie Warsztaty Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 2012.
10. Kawecki J., Maślowski R. Zastosowanie tłumików pasywnych, quasi-aktywnych i hybrydowych do redukcji drgań sejsmicznych i parasejsmicznych budowli – przegląd rozwiązań. 2010. Czasopismo Techniczne 11/2010.
11. Ciesielski R., Flaga A., Kawecki J. Aerodynamic effects on a non-typical steel chimney 120 m high. 1996. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 65.
12. Kędzierski M., Podstolak P., Ortyl Ł., Kuras P. Poprawa bezpieczeństwa i niezawodności kominów stalowych poprzez modernizację systemów tłumienia drgań. Artykuł X Konferencja Budownictwo w Energetyce. Szklarska Poręba 2016 (Materiały Budowlane nr 05/2016 str. 38–39).
13. Opis Patentowy PL 224186 – Mechaniczny tłumik poziomych drgań budowli wysokich, Podstolak P. i Kędzierski M.

APPLICATION OF VIBRATION DAMPERS FOR INDUSTRIAL STEEL CHIMNEYS MODERNIZATION

Abstract: This paper discusses the issues associated with protection of the industrial chimneys against vibrations caused by wind resonance and other dynamic loads. The analysis bases on the existing objects in which problems resulting from excessive vibration amplitudes occurred. Examples of five chimneys, from 25 to 120 m high, that were damaged because of excessive structural fatigue or the condition of which posed a threat are described. The attention is given to the history of operation of the chimneys and observations of dynamic forces, as well as their impact on the structures. The observed damages and structural fatigue are further analyzed. The work also describes the application of self-designed tuned mass dampers eliminating vibrations. The effectiveness of the devices in suppressing vibrations was experimentally measured and the results were compared to the values obtained before the installation of the dampers. The impact of logarithmic decrement on vibration amplitudes of the analyzed structures was estimated. Furthermore, the paper focuses on the basic issues concerned with mechanical resonance and hazards it may pose to the structures, as well as describes wind actions on high structures which may lead to resonance vibration. Special attention is given to the choice, optimal regulation and proper maintenance of tuned mass dampers.

Keywords: steel chimneys, mechanical dampers, mass dampers, modernization of chimneys, resonant vibration, vortex shedding, Benard-Karman vortices, wind resonance, mechanical resonance, material fatigue, logarithmic decrement