



Przegląd obecnego stanu wiedzy z zakresu techniki infradźwiękowej i możliwości wykorzystania fal akustycznych do oczyszczania urządzeń energetycznych

AUTORZY: Andrzej Noga^{a,*}

^a Zakład Automatyki i Kriogeniki, Instytut Inżynierii Lotniczej, Procesowej i Maszyn Energetycznych, Politechnika Wrocławska

* Adres do korespondencji: andrzej.noga@pwr.edu.pl, tel. 71 320 45 28

STRESZCZENIE

Potrzeba oczyszczania powierzchni ogrzewalnych kotłów, a także wewnętrznych powierzchni innych urządzeń energetycznych wymogła poszukiwania coraz lepszych i tańszych rozwiązań technicznych pozwalających utrzymać te powierzchnie w czystości. Praktycznym rozwiązaniem okazały się urządzenia zdmuchujące nagromadzone zanieczyszczenia za pomocą fali akustycznej. Liczne rozwiązania komercyjne pracują na falach o niskiej częstotliwości, często na infradźwiękach. Fale te mają wiele zalet, m.in. rozchodzą się równomiernie we wszystkich kierunkach ze stosunkowo niewielkimi stratami, dzięki czemu działają globalnie. Do wzmacniania fali wykorzystuje się zjawisko rezonansu akustycznego. Poziom dźwięku wytwarzanego przez generator zazwyczaj przekracza 110 dB. Artykuł zawiera zwięzły przegląd zagadnień związanych z wytwarzaniem fali subakustycznej i efektywnym oczyszczaniem urządzeń, oparty o studia literaturowe. Ponadto przedstawia wyniki pomiarów laboratoryjnych prostego układu złożonego z generatora fali małej mocy i tuby rezonansowej.

SŁOWA KLUCZOWE: *infradźwięki, oczyszczanie kotła, zdmuchiwanie akustyczne, wibroakustyka*

1. WPROWADZENIE

Rozwój techniki w XX wieku pozwolił na pełniejsze wykorzystanie zjawisk i praw rządzących nie tylko światem pojmowanym przez zmysły człowieka, lecz również dał możliwość zastosowania zjawisk zachodzących w świecie znajdującym się poza granicami tych zmysłów. W dużej mierze dotyczy to wykorzystania fal, zarówno elektromagnetycznych spoza widma fal widzialnych (IR, UV, radio, mikrofałe itd.), jak też akustycznych o częstotliwościach powyżej 20 kHz (echosonda, tomografia ultradźwiękowa) i poniżej 20 Hz, czyli nieodbieranych przez ludzkie ucho. Te ostatnie jednak, w przeciwieństwie do pozostałych, przez dłuższy czas uchodziły za niemające większego zastoso-

wania w technice. Ich wykrywanie było co prawda istotne w badaniach nad ruchami sejsmicznymi, ruchem lawin, czy wreszcie aktywnością wulkaniczną, niemniej brakowało urządzeń wykorzystujących je w swojej pracy.

Sytuację tę zmieniły badania dra Mattsa Olssona dotyczące ruchu drobin pyłu poddanych działaniu fali akustycznej. Okazało się, że ze względu na odwrotną proporcjonalność pomiędzy częstotliwością dźwięku a energią potrzebną do poruszenia cząstek najlepiej nadają się do tego właśnie infradźwięki [1]. Odkrycie to niosło nadzieję na możliwość zastosowania tych fal do oczyszczania wewnętrznych powierzchni urządzeń narażonych na duże zanieczyszczenia, a więc przede wszystkim urządzeń energetycznych. Nowatorska koncepcja stała się poważną alternatywą dla oczyszczania strumieniowego, w którym czynnikiem roboczym była woda, para lub sprężone powietrze, co m.in. powodowało zniszczenia erozyjne oczyszczanych urządzeń. Wprowadzenie do powszechnego użytku i rozwój urządzenia czyszczącego wymagało jednak opracowania niezawodnej konstrukcji, metody sterowania, a przede wszystkim – zrozumienia natury fal subakustycznych oraz metod ich wytwarzania.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE OCZYSZCZANIA AKUSTYCZNEGO

Powierzchnie wewnętrzne urządzeń energetycznych są narażone na osadzanie sadzy i pyłu węglowego, co zmniejsza sprawność urządzeń (np. poprzez pogorszenie wymiany ciepła – szczególnie w przypadku pokrywania wymienników poprzez osady syplkie, tworzące warstewki charakteryzujące się małą przewodnością cieplną [2]). Oczyszczanie powierzchni wewnętrznych podczas normalnej pracy bloku jest kłopotliwe ze względu na duże rozmiary urządzeń energetycznych w stosunku do zasięgu roboczego lanc zdmuchiwaczy strumieniowych oraz obecność trudnodostępnych miejsc. Zaletą oczyszczania akustycznego jest równomierne oddziaływanie fal we wszystkich kierunkach oraz ich mała absorpcyjność przez materiały konstrukcyjne.

Wytwarzanie fali akustycznej odbywa się w głowicy generatora najczęściej wskutek przerywania ciągu sprężonego powietrza [3], podobnie jak ma to miejsce w syrenie alarmowej [4], choć istnieją również inne rozwiązania, np. spalanie w równych odstępach czasowych mieszanki gazowej [5]. Powstające impulsy są źródłem zaburzenia ośrodka za głowicą – naruszenia jego stanu równowagi. Zaburzenie to propaguje w przestrzeni tworząc falę akustyczną biegnącą o częstotliwości równej częstotliwości wytwarzania impulsów sprężonego powietrza. Ponieważ równanie ruchu fali jest równaniem liniowym (ze względów praktycznych ograniczamy je do jednego wymiaru):

$$\nabla^2\Psi = \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} \quad (1)$$

gdzie: Ψ – zaburzenie stanu równowagi, c – prędkość dźwięku w ośrodku, w którym rozchodzi się zaburzenie, t – czas, x – odległość od punktu powstania zaburzenia.

Podlega ono zasadzie superpozycji, a więc jeśli nastąpi interferencja fal o równych amplitudach oraz częstotliwościach, propagujących w przeciwnych kierunkach:

$$\Psi_1 = A \cdot \cos 2\pi \cdot \left(\frac{x}{\lambda} - ft\right) \quad (2)$$

$$\Psi_2 = A \cdot \cos 2\pi \cdot \left(\frac{x}{\lambda} + ft\right)$$

powstanie fala stojąca, której amplituda będzie sumą amplitud interferujących fal [6]:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = 2A \cdot \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cdot \cos 2\pi ft \quad (3)$$

Aby takie akustyczne wzmocnienie było możliwe potrzebny jest odpowiedni ustrój, w którym nastąpi odbicie fali. Najprostszym jego przykładem jest otwarty lub jednostronnie zamknięty przewód o przekroju kołowym – falowód. Mając daną długość przewodu L , z równania ruchu fali można wyznaczyć tzw. mody drgań ośrodka gazowego w przewodzie.

2.1. REZONANS AKUSTYCZNY

W przewodzie otwartym na obu jego końcach ciśnienie będzie miało wartość ciśnienia otoczenia (a więc najczęściej atmosferycznego lub zbliżonego do atmosferycznego), co prowadzi do otrzymania warunku:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

gdzie: ξ – zakłócenie ośrodka.

Z kolei na zamkniętym końcu wystąpi warunek:

$$\xi = 0 \quad (5)$$

jako że nie jest możliwe przeniknięcie cząsteczek gazu przez sztywną ściankę. Zastosowanie powyższych warunków brzegowych prowadzi do uzyskania poniższych równań [6]:

- dla przewodu otwartego:

$$\xi = A \cdot \cos \frac{k\pi x}{L} \cdot \cos\left(\frac{k\pi ct}{L} + \varepsilon\right) \quad (6)$$

gdzie k jest kolejną liczbą naturalną, natomiast ε – przesunięciem fazowym,

- oraz dla przewodu jednostronnie zamkniętego:

$$\xi = A \cdot \sin\left(k + \frac{L}{2}\right) \cdot \frac{\pi x}{L} \cdot \cos\left[\left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\pi ct}{L} + \varepsilon\right] \quad (7)$$

a więc częstotliwości fal, które w tych przewodach utworzą falę stojącą wynoszą odpowiednio:

$$f = \frac{nc}{2L} \quad (8)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

oraz

$$f = \frac{nc}{4L} \quad (9)$$

$$n = 1, 3, 5, \dots$$

Wartość n we wzorach 8 i 9 jest numerem modu. Wynika stąd, że w przewodzie o danej długości nastąpi wzmocnienie (tzw. rezonans akustyczny) jedynie fal o wybranych częstotliwościach. Najniższą z nich nazywa się modem podstawowym, pozostałe – wyższymi harmonicznymi. Łatwo też można wykazać, że długość fali modu podstawowego jest dwukrotnie większa od długości samego przewodu dla przewodu otwartego i czterokrotnie większa od długości przewodu w przypadku przewodu jednostronnie zamkniętego. W urządzeniach służących do oczyszczania dźwiękiem używa się przewodu jednostronnie zamkniętego, na którego otwartym końcu montuje się dyfuzor który z kolei montuje się, stosując wibroizolację, w ścianie oczyszczanego urządzenia [7].

Koniec falowodu umieszczony we wnętrzu urządzenia możemy traktować jako źródło punktowe, z którego rozchodzi się fala akustyczna kulista o częstotliwości równej częstotliwości fali stojącej generowanej w falowodzie. Fala ta propagując w przestrzeni oczyszczanego urządzenia oddziałuje swoją energią na napotkane elementy (a przez to również na zalegające na nich osady); nie bez znaczenia jest też fakt, że rozchodząc się w ośrodku gazowym powoduje naprzemienne miejscowe sprężanie i rozprężanie tego ośrodka (propagacja fali podłużnej). Jeśli więc znajdzie się w nim drobina pyłu lub sadzy, zostanie ona wprawiona w ruch wraz z cząsteczkami gazu, w którym jest zawieszona. To z kolei unieвозможи jej osadzenie na powierzchni konstrukcji [8]. Z kolei cząstki, które zdążyły już osiąść na powierzchniach są strącane w wyniku dwóch zjawisk powodowanych przez falę akustyczną: fluidyzację warstwy zanieczyszczeń oraz wibrację elementów konstrukcji [8].

3. WYBRANE PROBLEMY ZWIĄZANE Z OCZYSZCZANIEM AKUSTYCZNYM

3.1. ZAKRES CZĘSTOTLIWOŚCI

Badania nad możliwością poruszenia drobin pyłu w wyniku działania fali akustycznej wykazały, że poziom ciśnienia akustycznego, definiowany jako:

$$L = 20 \cdot \log \frac{p}{p_{ref}} \quad (10)$$

$$p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} Pa$$

gdzie p jest wartością skuteczną – średnią kwadratową ciśnienia fali akustycznej, natomiast p_{ref} – wartością skuteczną ciśnienia odniesienia przy którym cząsteczki zaczynają wykazywać zdolność do przemieszczenia, jest tym wyższy, im wyższa jest częstotliwość fali [1]. Z tego względu do oczyszczania akustycznego najlepiej nadają się infradźwięki oraz pewien zakres niskich dźwięków słyszalnych (źródła podają graniczne górne wartości od 200 do 400 Hz). Podstawowym problemem jest więc długość rezonatora – dla urządzenia pracującego w zakresie infradźwięków są to długości powyżej 4 metrów. Do wzmacniania wyższych częstotliwości, w urządzeniach stoso-

wanych jedynie do lokalnego oczyszczania (ze względu na właściwości dźwięków niskoczęstotliwościowych słyszalnych), używa się częściej tub wykładniczych, które lepiej nadają się do wzmacniania tego spektrum fal. Jednak w przypadku niższych częstotliwości w praktyce przemysłowej używa się głównie długich, a przez to mało wygodnych, falowodów cylindrycznych.

Kolejnym zagadnieniem związanym z niskimi częstotliwościami jest kwestia ich oddziaływania na człowieka. Jak podaje [9], fale o niskiej częstotliwości mogą prowadzić do choroby wibroakustycznej (Vibroacoustic Disease – VAD) jeśli poziom ciśnienia akustycznego przekracza 110 dB. Jej konsekwencjami mogą być m.in. zmęczenie, niestrawność i wahania nastrojów, a w przypadku dłuższego oddziaływania na organizm nawet zaburzenia neurologiczne i psychiatryczne. W przypadku elektrowni źródłem hałasu niskoczęstotliwościowego (jak go określa [10]) są nie tylko zdmuchiwalce akustyczne, ale również np. wiry Karmana powstające w kotłach, jak też pracujące maszyny [9]. Poziom dźwięku emitowany przez zdmuchiwalce wynosi od 120 do nawet ponad 140 dB Lin (dane dla urządzeń oczyszczających kotły wodne o mocach 40-500 GJ/h, [8]). W przeciwieństwie do pozostałych źródeł hałasu, nie jest on emitowany w sposób ciągły ze względu na specyfikę pracy urządzenia czyszczącego – fala akustyczna generowana jest przez kilkadziesiąt sekund, kilka-kilkanaście razy na godzinę. W dodatku, jak podaje [1], fale dźwiękowe są stosunkowo dobrze odbijane przez ścianki kotła i nie ma zagrożenia dla personelu. Podobną opinię, przywołując ekspertyzę wykonaną na urządzeniu krajowej produkcji, przytacza [11].

3.2. STEROWANIE

Kolejnym ważnym problemem jest sterowanie pracą urządzenia. Na sprawność procesu wpływ ma przede wszystkim częstotliwość generowanej fali. Jeśli nie będzie ona równa częstotliwości rezonansowej, wtedy sprawność urządzenia będzie niska [8]. W dodatku już niewielkie różnice, rzędu dziesiątych części herca, powodują widoczny spadek sprawności zdmuchiwalca. Zmiana częstotliwości o 0,5 Hz powoduje spadek sprawności o ponad 50% [1]. Konieczne jest więc zastosowanie odpowiedniego sprzężenia zwrotnego. W tym celu potrzebny jest czujnik, którym może być np. membrana [1], mikrofon lub czujnik ciśnienia gazów, z którego sygnał będzie określał, czy urządzenie pracuje w rezonansie. W przypadku, gdy nie będzie on zachodził, przez odpowiednie połączenie z napędem impulsatora zadana zostanie większa lub mniejsza prędkość obrotowa, co przełoży się na zmianę częstotliwości impulsów (a przez to i generowanej fali) i dostrojenie jej do częstotliwości rezonansowej. Ponieważ częstotliwość rezonansowa jest zależna (wzory 8 i 9) od prędkości dźwięku w ośrodku, w którym fala propaguje, jest oczywiste, że ze względu na możliwe fluktuacje lokalnych temperatur w oczyszczanych wnętrzach stosowanie odpowiedniego sprzężenia zwrotnego jest istotnym zagadnieniem, a sam czujnik sprzężenia zwrotnego – urządzeniem newralgicznym dla poprawnej pracy całego układu.

3.3. MIEJSCE MOCOWANIA

Fale niskoczęstotliwościowe są słabo tłumione przez ośrodek, w którym się rozchodzą [8], tak więc zdmuchiwacz akustyczny może zostać zainstalowany w dowolnym miejscu oczyszczanego urządzenia, gdyż fale dotrą do wszystkich jego punktów. W praktyce miejsce zamocowania oraz ilość urządzeń jest jednak skrupulatnie dobierane w oparciu o dotychczasowe doświadczenia eksploatacyjne i badawcze. I tak na przykład, jak podaje [11], w przypadku dużych kotłów instaluje się nawet dwa zdmuchiwacze (i oddzielne na podgrzewaczach powietrza). Co ważne dla oszczędności miejsca w hali zakładu energetycznego, urządzenie można zamocować w układzie pionowym, nawet jeśli wylot z rezonatora umieszczony jest w ścianie bocznej, gdyż istnieje możliwość zainstalowania kolanka [11]. Współcześnie w procesie doboru miejsca instalacji dużą rolę odgrywa jednak modelowanie akustyczne [12]. Dobór ten jest przeprowadzany indywidualnie dla każdego typu oczyszczanego urządzenia.

3.4. WYTWARZANIE INFRADŹWIĘKÓW

Wśród zagadnień związanych z infradźwiękami, jednym z głównych problemów jest konstrukcja łatwo sterowalnego generatora o dużej mocy. Badania J. Parka, M. Garcésa i B. Thigpena pokazały, że urządzeniem, które może tę lukę uzupełnić jest obrotowy subwoofer (rotary subwoofer) [13]. Działa ono na zasadzie przekształcania energii drgań cewki w energię ruchu obrotowego piasty, na której umieszczone są specjalne łopatki, które podczas obrotów powodują przemieszczanie się cząstek ośrodka. Łopatki nie są osadzone na sztywno – mają możliwość zmiany kąta nachylenia, dzięki czemu można w dużym zakresie zmieniać prędkość nadawaną cząstkom ośrodka [13].

3.5. REZONATORY

We wstępie przedstawiono budowę prostego, cylindrycznego falowodu, będącego rezonatorem fali akustycznej. Warto jednak zwrócić uwagę, że nie jest to jedyny stosowany układ. Fale słyszalne o częstotliwościach rzędu setek herców są zazwyczaj wzmacniane, o czym było już wspomniane, w tubach cylindrycznych [14].

W 2003 roku J. K. Domen opatentował też rezonator Helmholtza dla infradźwięków. Rezonator Helmholtza jest prostym urządzeniem złożonym z komory wypełnionej ośrodkiem gazowym o objętości V oraz szyjki o długości l i polu przekroju poprzecznego S . Przyrównując ów układ do obwodu elektrycznego otrzymujemy najprostszyszy układ RLC złożony z opornika o rezystancji R , kondensatora o pojemności C , cewki o indukcyjności L i źródła napięcia połączonych szeregowo [4], przy czym:

$$R = 2\pi\rho \frac{f^2}{c} \quad (11)$$

$$L = \rho \frac{l}{S} \quad (12)$$

$$C = \frac{V}{\rho c^2} \quad (13)$$

gdzie: ρ jest gęstością ośrodka gazowego, f – częstotliwością fali, natomiast c – prędkością dźwięku. Stąd też dostajemy wzór opisujący częstotliwość rezonansową:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot l}} \quad (14)$$

Warto dodać, że częstotliwość ta nie zależy od kształtu komory, zależy jedynie (jak wynika ze wzoru 14) od wymiarów szyjki i objętości komory. Rezonator Helmholtza dla infradźwięków ma natomiast kształt prostopadłościanu, w którym zamocowane są dwie ruchome szyjki o różnych długościach – każda z nich jest dostosowana do wzmacniania innego zakresu fal. Dostrojenie rezonatora do żądanej częstotliwości odbywa się poprzez odpowiednie wysunięcie lub schowanie odpowiedniej z szyjek [15].

Kolejnym rodzajem falowodu, jaki można zastosować do wzmacniania fal akustycznych jest rezonator cylindryczny z długą szyjką [16]. Składa się on z dwóch połączonych ze sobą przewodów – dłuższego o średnicy D i długości L i krótszego (szyjki) o średnicy d i długości l , przy czym $D > d$. Wartości częstotliwości rezonansowych obliczone z modelu opracowanego przez autorów, potwierdzone wynikami pomiarów, pokazują, że w takim układzie wzmocnienie fali akustycznej nastąpi przy niższej częstotliwości (a więc wzmacniane będą dłuższe fale), niż w przypadku wzmacniania jej w klasycznym rezonatorze cylindrycznym o długości równej długości L . Obserwujemy więc korzystne zjawisko pozwalające na zastosowanie nieco krótszych falowodów.

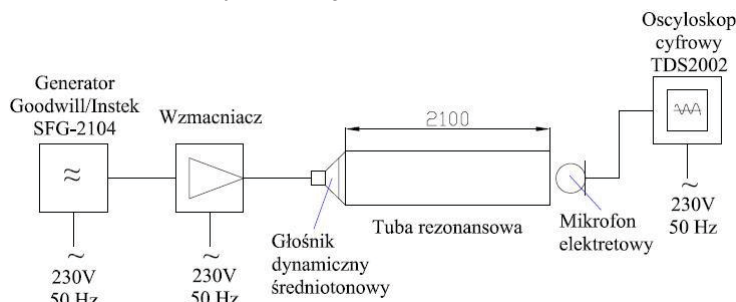
4. KORZYŚCI Z ZASTOSOWANIA ZDMUCHIWACZY AKUSTYCZNYCH

Zdmuchiwacze akustyczne stosuje się do oczyszczania rozmaitych urządzeń energetycznych: kotłów, podgrzewaczy powietrza, elektrofiltrów, reaktorów odsiarczania spalin, cyklonów, czy nawet rurociągów transportowych [11, 14]. Urządzenie podobnej konstrukcji jest używane do fluidyzacji materiału sypkiego [14]. Poza tym technika infradźwiękowa jest też używana np. do chłodzenia radiatorów [17]. Generatory infradźwięków dużej mocy pracują w wielu zakładach energetycznych, a także w przemyśle. Istnieje również możliwość oczyszczania za ich pomocą powierzchni kotłów opalanych innymi paliwami, niż pył węglowy, np. biomasą lub odpadami [18]. Doświadczenia poszczególnych zakładów pokazują, że urządzenie to jest skuteczne i efektywne i w wielu przypadkach z powodzeniem może zastąpić zdmuchiwacze strumieniowe, a w innych – współpracować równolegle z nimi. Na przykład zamontowanie generatora na kotle fluidalnym CFB o mocy 75 MW pracującym w elektrowni Norrköping w Szwecji spowodowało znaczne zmniejszenie częstości załączania parowego zdmuchiwacza sadzy z 3-4 razy dziennie do 1 załączenia na tydzień. W dodatku wzrosła produkcja energii elektrycznej [12]. Z kolei krajowe urządzenia

pracujące na kotłach OP-430 w elektrociepłowni w Krakowie przyczyniły się do spadku temperatury wylotowej spalin o 20 stopni, a także stabilniejszej pracy kotła [11]. Z innych obserwowanych korzyści zastosowania oczyszczania akustycznego wymienić można m.in. wzrost sprawności kotła i znacznie dłuższą eksploatację pomiędzy postojami [8]. To wszystko przekłada się oczywiście na mniejsze koszty wytwarzania energii cieplnej lub/i elektrycznej oraz oszczędności wygenerowane przez mniejszą ilość postojów technicznych bloków.

5. BADANIA LABORATORYJNE

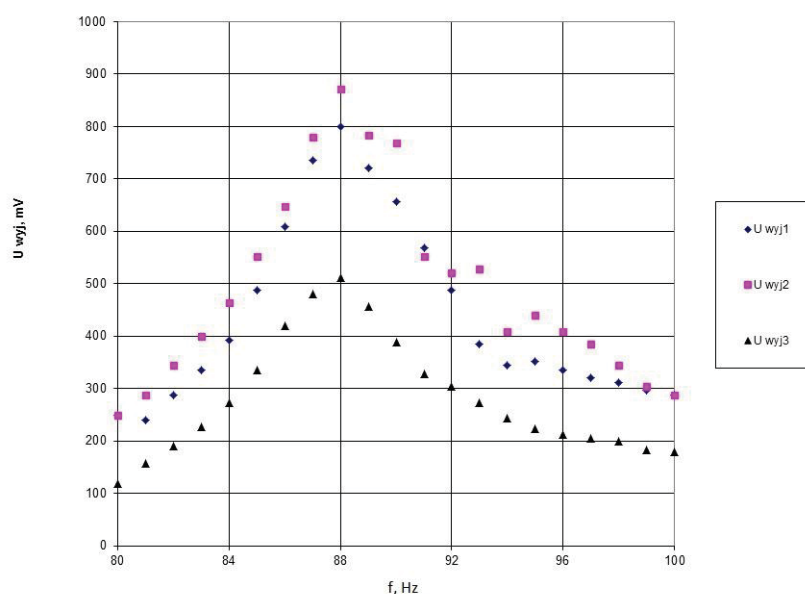
Do przeprowadzenia pomiarów zmian poziomu ciśnienia akustycznego w zależności od odległości pomiędzy otworem wylotowym z rezonatora a płaską ścianą zastosowano prosty układ składający się z generatora sygnału o ustawianej częstotliwości, wzmacniacza i głośnika średniotonowego dynamicznego oraz rury PCV o długości 2100 mm i średnicy 50 mm jako rezonatora.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

Aby zmierzyć zmiany poziomu ciśnienia fali na wylocie z tuby umieszczono mikrofon elektretowy. Napięcie sygnału wytworzonego przez mikrofon (które jest proporcjonalne do panującego poziomu ciśnienia akustycznego) odczytywane było na oscyloskopie. Wartości te zmierzone zostały dla trzech układów, w których zmieniała się tylko odległość wylotu od ściany laboratorium – w pierwszym pomiarze było to 25 cm (U_{wyj1}), w drugim 60 cm (U_{wyj2}), natomiast w trzecim przypadku (U_{wyj3}) wylot ustawiono w znacznym oddaleniu od ściany (większym, niż długość samego rezonatora). Celem przeprowadzenia pomiarów w trzech różnych konfiguracjach przestrzennych było sprawdzenie wpływu obecności płaskiej ściany na częstotliwość rezonansową fali akustycznej oraz na natężenie sygnału w przestrzeni, co ma związek z problematyką miejsca mocowania urządzenia (rozd. 3.3). Wyniki pomiarów przedstawia rys. 2. Widać na nim, że na częstotliwość rezonansową nie ma wpływu odległość wylotu z tuby od ścianki, co jest zgodne z teorią powstawania fali stojącej w rezonatorze (równ. 4-9), zgodnie z którą jej częstotliwość zależy tylko od wymiarów rezonatora i prędkości dźwięku w danym ośrodku gazowym. Obecność ściany wpływa jedynie na poziom ciśnienia akustycznego dźwięku, panujący na wylocie z rezonatora – sygnał jest mocniejszy, gdy wylot znajduje się w pobliżu powierzchni płaskiej. Zjawisko to można tłumaczyć odbiciem dźwięków o niskich częstotliwościach.

ściach przez ściany. Gdy wylot z tuby znajduje się w znacznej odległości od płaskich powierzchni, natężenie fali znacznie słabnie – widać brak wspomnianego efektu ze względu na tłumienie energii fali akustycznych przez ośrodek, w którym propagują. Wydaje się więc rozsądnym umieszczenie wylotu z rezonatora w odpowiednio bliskiej (odpowiednio do mocy zdmuchiwacza) odległości od ścianki oczyszczanego urządzenia. Równie ważnym zagadnieniem związanym z doбором miejsca montażu tuby rezonansowej jest zamodelowanie rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni roboczej oczyszczanego urządzenia w zależności od ilości i rozmieszczenia pracujących wdmuchiwaczy oraz weryfikacja otrzymanych wyników w drodze dalszych badań laboratoryjnych.



Rys. 2. Wykres zależności poziomu ciśnienia akustycznego od częstotliwości generowanej fali akustycznej

6. WNIOSKI

Wykorzystanie fal akustycznych do oczyszczania powierzchni wewnętrznych urządzeń energetycznych pozwoliło wielu zakładom na zmniejszenie częstotliwości oczyszczania zarówno podczas pracy bloku (zdmuchiwacze strumieniowe), jak też podczas postoju (oczyszczanie przez ekipy remontowe). Pozwoliło to na zmniejszone zużycie czynnika roboczego zdmuchiwacza strumieniowego (wody, pary lub sprężonego powietrza) i mniejsze szkody powodowane przez zniszczenia erozyjne materiału wymienników ciepła i innych. Natomiast wydłużenie czasu pracy bloku pomiędzy postojami przynosi wymierne korzyści ekonomiczne. Warto też zwrócić uwagę, że zwiększając sprawność kotła, uzyskuje się mniejsze zużycie paliwa, a więc też mniejszą ilość spalin emitowanych do atmosfery. Zdmuchiwacz akustyczny można więc

określić jako urządzenie przyczyniające się do zmniejszenia niekorzystnego oddziaływania zakładu energetycznego na środowisko naturalne.

Metoda akustyczna jest, jak podaje [8], bardziej skuteczna w kotłach energetycznych zbudowanych w technologii ścianek szczelnych niż w pozostałych, natomiast, jak już zostało wspomniane, nie jest ograniczona tylko do kotłów opalanych węglem. Zdmuchiwacze infradźwiękowe stosuje się też zarówno do oczyszczania potężnych wytwornic pary, jak i ciepłowniczych kotłów wodnych.

Prace nad generatorami infradźwięków dużej mocy są prowadzone w wielu europejskich i światowych placówkach naukowych i badawczych. Jest to jeden z argumentów świadczących o dużych nadziejach pokładanych w potencjalnych możliwościach wykorzystania tego zakresu fal akustycznych. Sukcesywny rozwój technologii wytwarzania i wzmacniania fal subakustycznych pozwala widzieć w tej metodzie potencjalnego lidera wśród metod oczyszczania wnętrza urządzeń.

LITERATURA

- [1] **Jędrusyna Cz.:** *Wykorzystanie techniki infradźwięków do oczyszczania powierzchni ogrzewalnych kotłów i urządzeń pomocniczych*, *Energetyka*, lipiec 2008, 516–519, 2008.
- [2] **Pronobis M.:** *Modernizacja kotłów energetycznych*, wydanie 1, WNT, 2013.
- [3] **Olsson M.:** *An air-driven low frequency sound generator and a method for regulating the piston in such a generator*, Patent No. EP1542810B1.
- [4] **Hueter T.F., Bolt R.H.:** *Sonics : techniques for the use of sound and ultrasound in engineering and science*, Wiley, 1955 (Repr. 1966).
- [5] Nirafon Oy website, <http://www.nirafon.com/>, 05.03.2014.
- [6] **Coulson C.A.:** *Waves. A mathematical account of the common types of wave motion*, 5th Edition, Edinburgh: Oliver and Boyd, 1949.
- [7] **Olsson M.:** *Infrasound generator*, U.S. Patent No. 4, 624, 220.
- [8] **Felis J., Kasprzyk S.:** *Akustyczna metoda usuwania osadów pyłowych w kotłach energetycznych*, XV Ogólnopolska konferencja naukowo-dydaktyczna teorii maszyn i mechanizmów, Białystok-Białowieża, 17-21 września 1996, 93-100, 1996.
- [9] **Engel Z., Kaczmarska A., Augustyńska D.:** *Badania wpływu nadmiernej ekspozycji na hałas niskoczęstotliwościowy – choroba wibroakustyczna*, *Bezpieczeństwo Pracy*, 11/2005, 4-7, 2005.
- [10] PN-86/N-01338.
- [11] **Felis J., Szydło J.:** *Pylofon – akustyczna metoda usuwania osadów pyłowych*, *Energetyka*, 9/1994, 313-316, 1994.
- [12] **Torra i Fernández È., Ellebro M.:** *Online soot cleaning using infrasound*, *VGB PowerTech*, 8/2013, 84-87, 2013.
- [13] **Park J., Garcés M., Thigpen B.:** *The rotary subwoofer: A controllable infrasound source*, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 125, No. 4, 2006-2012, 2009, DOI: 10.1121/1.3082115.
- [14] Kockum Sonics website, <http://www.kockumsonics.com>, 12.03.2014.
- [15] **Domen J.K.:** *Infrasonic Helmholtz resonator*, U.S. Patent No. 6,665,413.
- [16] **Li D., Zheng L., Ou L.:** *Resonance frequency calculation of long-neck cylindrical acoustic resonators*, *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 541-542, 478-481, 2014, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.541-542.478.
- [17] **Tullstedt C. H., Bergman P., Edgren A.:** *Device for increasing heat transfer*, U.S. Patent No. 6, 252, 769.
- [18] Infrafone AB website, <http://www.infrafone.se>, 26.03.2014.