

Adam RUZIEWICZ<sup>1</sup>  
Jacek LAMPERSKI<sup>2</sup>

## ANALIZA PROCESÓW KONWERSJI ENERGII W URZĄDZENIU TERMOAKUSTYCZNYM

Działanie urządzeń termoakustycznych (TA) opiera się na efekcie termoakustycznym opisanym przez Rayleigha już w XIX w. Przy odpowiednio wysokiej różnicy temperatur wzdłuż tuby akustycznej gaz zaczyna samoistnie oscylować, generując dźwięk. Praca urządzeń TA wykorzystujących falę biegnącą jest oparta na termodynamicznym obiegu Stirlinga. Silnik termoakustyczny w swojej konstrukcji przypomina klasyczny silnik Stirlinga – wykorzystuje pracę nagrzewnicy, chłodnicy i umieszczonego między nimi regeneratora. Energia mechaniczna otrzymana przez naprzemienne sprężanie i rozprężanie cząstek gazu przyjmuje postać energii niesionej przez falę dźwiękową, która w tym wypadku zastępuje pracę tłoka. W urządzeniach TA następuje zatem konwersja energii cieplnej w akustyczną (silniki) lub energii akustycznej w ciepłą (pompy ciepła). Urządzenia TA charakteryzują się prostą budową i nie posiadają części ruchomych. Artykuł przedstawia podstawową zasadę działania urządzeń termoakustycznych oraz towarzyszących temu procesów konwersji energii. Analizie poddano proces rozpraszania energii na regeneratorskiej stronie urządzenia termoakustycznego oraz jego obieg termodynamiczny przy uwzględnieniu oscylacyjnego ruchu gazu. Zaprezentowano, w jaki sposób cząstka gazu przechodzi obieg termodynamiczny i jak kontakt termiczny cząstki i ścianki regeneratora wpływa na ten proces. Omówiono również warunki potrzebne do wystąpienia efektu termoakustycznego dla przesunięcia fazowego między ciśnieniem akustycznym a prędkością akustyczną, odpowiadającego fali stojącej oraz fali biegnącej. Przedstawiono także bilans energii przykładowego urządzenia oraz możliwości jego zastosowania.

**Słowa kluczowe:** termoakustyka, obieg termodynamiczny, obieg Stirlinga, energia fali akustycznej

### 1. Wstęp

Energia akustyczna może zostać zamieniona w energię mechaniczną, energię elektryczną oraz energię ciepłą, a także odwrotnie – każdą z tych energii można przetworzyć w energię akustyczną. Silnik termoakustyczny jest urządzeniem, które bezpośrednio realizuje konwersję ciepła w moc akustyczną fali

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Adam Ruziewicz, Politechnika Wrocławska, ul. Plac Grunwaldzki 9, 50-370 Wrocław, tel.: (71) 3203091, e-mail: adam.ruziewicz@pwr.edu.pl.

<sup>2</sup> Jacek Lamperski, Politechnika Wrocławska, e-mail: jacek.lamperski@pwr.edu.pl.

dźwiękowej. Podstawowa zasada jego działania opiera się na zjawisku opisanym przez Rayleigha [9]. Już w 1896 r. rozważał on możliwość transportu ciepła za pomocą fali dźwiękowej. Zdefiniował również podstawowe kryterium działania takich urządzeń: stwierdził, że oscylująca ekspansja i kompresja gazu generuje moc akustyczną, jeśli tylko ciepło jest dostarczane do gazu w momencie jego największej kompresji i odbierane w momencie jego największej ekspansji, a także odwrotnie – oscylująca ekspansja i kompresja mogą same być wywołane falą akustyczną, pod warunkiem że gaz znajduje się w kanale, w którym występuje gradient temperatur. Zjawisko to zostało później nazwane przez Rotta [10] efektem termoakustycznym. W swojej pracy z 1969 r. jako pierwszy wyprowadził on matematyczne wyrażenia dotyczące transportu energii w urządzeniach termoakustycznych.

Niewątpliwą zaletą tych urządzeń jest brak elementów ruchomych w części silnikowej, co zdecydowanie odróżnia je od konwencjonalnych silników cieplnych. W przypadku urządzeń termoakustycznych obieg termodynamiczny jest wymuszany nie przez ruch części mechanicznych, lecz przez właściwości fali akustycznej, czyli odpowiednie przesunięcie fazowe między oscylującym ciśnieniem a oscylującą prędkością. Brak części ruchomych zwiększa żywotność i niezawodność urządzeń termoakustycznych. Jak już wspomniano, obieg termodynamiczny determinuje przesunięcie fazowe między prędkością a ciśnieniem akustycznym. Według tego kryterium wyróżnia się falę stojącą i falę biegnącą. Urządzenia z falą stojącą pracują w przybliżeniu, opierając się na obiegu Braytona i osiągają sprawność do 20%. Fala biegnąca z kolei pozwala na realizację obiegu Stirlinga, który przy idealnej regeneracji ciepła osiąga sprawność Carnota. Możliwie wysoka sprawność tych urządzeń sprawia, że poświęca się im większą uwagę i kładzie duży nacisk na ich rozwój.

Pierwszą próbę skonstruowania urządzenia wykorzystującego falę biegnącą podjął w latach 80. XX w. Ceperley [3], który jako pierwszy zauważył relację między fazą ciśnienia i prędkości fali biegnącej a obiegiem Stirlinga [5]. Jego eksperyment z zapętloną tubą nie powiódł się jednak, ze względu na niską impedancję fali akustycznej, a co za tym idzie – wysoką prędkość oscylacji, która powodowała duże straty lepkościowe na regeneratorze. Dwie dekady później problem ten udało się rozwiązać, zwiększając miejscową impedancję przez zastosowanie zapętlonej tuby wraz z bocznym rezonatorem z falą stojącą. Termoakustyczny silnik cieplny, skonstruowany w 1999 r. przez Backhaus i Swifta z Los Alamos National Laboratory [1], osiągnął sprawność termiczną równą 30 oraz 42% w odniesieniu do sprawności Carnota. Prawie jednocześnie de Blok opatentował w Holandii podobne urządzenie [6]. Kolejny krok w rozwoju termoakustyki stanowiły urządzenia wielosekcyjne [5], zapewniające propagację fali biegnącej przy ograniczeniu strat lepkościowych. Aby dokładnie zrozumieć pojęcie przepływu ciepła przy wykorzystaniu fali akustycznej w urządzeniach termoakustycznych oraz zasady działania tych urządzeń, w kolejnych punktach został podjęty temat konwersji energii.

## 2. Podstawowe pojęcia

Falę akustyczną można traktować jak rozchodzące się zaburzenie gęstości, ciśnienia, temperatury i energii ośrodka, które powoduje miejscowe drgania jego cząsteczek. Oscylacje ciśnienia oraz strumienia przepływu gazu można wykorzystać do transportu ciepła w efekcie termoakustycznym. Ruch harmoniczny cząstek gazu powoduje wzrost gradientu temperatury wzdłuż regeneratora lub odwrotnie – gradient temperatury wywołuje miejscowe drgania gazu. Aby móc opisać to zjawisko, należy przedstawić kilka wielkości charakteryzujących falę akustyczną. Pierwszą z nich jest długość fali  $\lambda$  wyrażona wzorem:

$$\lambda = \frac{a}{f} \quad (1)$$

gdzie:  $a$  – prędkość dźwięku,  $f$  – częstotliwość oscylacji.

Kolejnym ważnym parametrem jest amplituda przemieszczenia gazu  $\xi$ , wyrażona zależnością:

$$\xi = \frac{u_a}{\omega} \quad (2)$$

gdzie:  $u_a$  – amplituda prędkości gazu,  $\omega = 2\pi f$  – częstotliwość kątowna.

Długość  $2\xi$  (w kierunku równoległym do ruchu gazu) odpowiada odległości między maksymalnym a minimalnym położeniem cząstki gazu podczas drgania. Wymienione wielkości opisują falę akustyczną w kierunku równoległym do jej propagacji.

W termoakustyce parametrem określającym falę akustyczną w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu gazu jest termiczna głębokość wnikania:

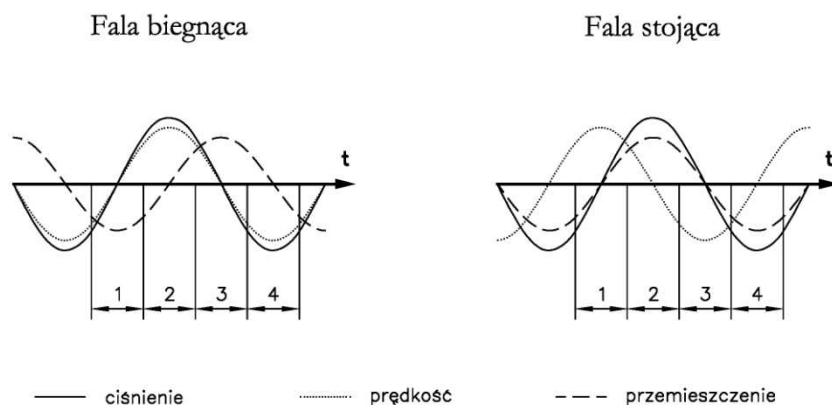
$$\delta_\kappa = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho c_p}} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\omega}} \quad (3)$$

gdzie:  $k$  i  $\kappa$  – odpowiednio współczynnik przewodzenia ciepła i współczynnik dyfuzji gazu,  $c_p$  – ciepło właściwe gazu przy stałym ciśnieniu [14].

Wielkości te charakteryzują kontakt termiczny cząstek gazu z ciałem stałym przy danej częstotliwości.

Fale akustyczne charakteryzują się różnym przesunięciem fazowym między ciśnieniem akustycznym ( $p$ ) a prędkością akustyczną ( $v$ ) oraz między ciśnieniem akustycznym a przemieszczeniem cząsteczki gazu ( $\xi$ ). Fala biegnąca tworzy się, kiedy oscylujące ciśnienie pozostaje w fazie z prędkością, natomiast między ciśnieniem a przemieszczeniem cząstki gazu występuje przesunięcie fazowe

$\theta = \pi/2$  (rys. 1.). Fala stojąca powstaje natomiast przez nałożenie się dwóch fal propagujących w przeciwnych kierunkach. Jej prędkość akustyczna pozostaje w fazie z przemieszczeniem gazu i jest przesunięta o  $\pi/2$  względem ciśnienia. Trzeba jednak podkreślić, że w praktyce osiągnięcie idealnej fali stojącej i biegnącej jest niemożliwe, stąd w urządzeniach termoakustycznych wykorzystujących fale biegnącą mogą wystąpić niewielkie komponenty fali stojącej i odwrotnie.



Rys. 1. Porównanie fali stojącej i biegnącej. Ciśnienie, przemieszczenie i prędkość cząsteczki gazu w funkcji czasu. Kolejne fazy cyklu: 1 – kompresja, 2 – ogrzewanie, 3 – ekspansja, 4 – ochładzanie

Fig. 1. Comparison of a standing and travelling waves. Pressure, displacement and velocity of gas parcel as a function of time. The cycle phases: 1 – compression, 2 – heating, 3 – expansion, 4 – cooling

Kolejnym ważnym parametrem opisującym falę akustyczną jest wspomniana już wcześniej impedancja, czyli oporność fali [8]. Określa ona bezpośrednio stosunek ciśnienia akustycznego do prędkości akustycznej i wyraża się wzorem:

$$Z = \frac{P}{v} \quad (4)$$

Można zauważyć, że przy wysokich prędkościach oscylujących cząstek impedancja jest mała, lecz niestety zależne od prędkości straty lepkościowe tłumią propagację dźwięku. Urządzenia termoakustyczne konstruuje się zatem tak, aby zwiększyć impedancję na regeneratorze.

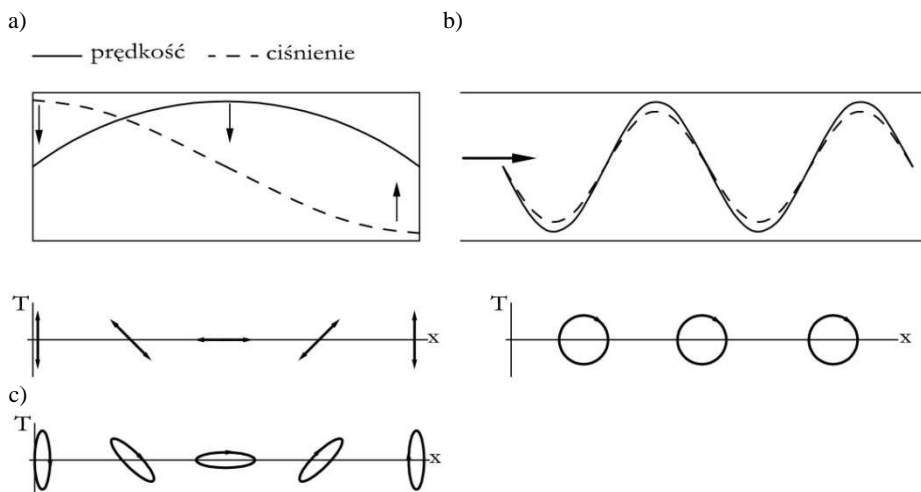
### 3. Oscylacje ciśnienia

Proces konwersji energii w urządzeniu termoakustycznym zachodzi poprzez kontakt termiczny między gazem a ciałem stałym. Ciałem stałym w urzą-

dzeniu jest regenerator, czyli porowata struktura o dużej pojemności cieplnej i małej średnicy porów. Wymiarem charakterystycznym porów, w których oscyluje gaz, jest promień hydrauliczny  $r_h$ , będący z definicji stosunkiem objętości do powierzchni zwilżanej lub pola przekroju do obwodu zwilżanego i zależny od stosunków geometrycznych. W niniejszej analizie będzie również używana wielkość  $y$ , charakteryzująca odległość cząstki gazu od ścianki regeneratora. Istotę działania efektu termoakustycznego najprościej można przedstawić, rozważając ruch oscylacyjny bardzo małej objętości gazu wzdłuż warstwy przyściennej. Tę małą objętość nazywa się cząstką gazu. Fala dźwiękowa sprawia, że cząstka gazu wykonuje ruch harmoniczny w przód i w tył względem swojego środkowego położenia, w kierunku propagacji tej fali. Przejście fali powoduje, że podczas tego ruchu cząstka zwiększa i zmniejsza naprzemiennie swoje ciśnienie. Właśnie naprzemiennie sprężanie i rozprężanie w połączeniu z dostarczaniem i odbieraniem ciepła może zainicjować obieg termodynamiczny.

Jak zaobserwował Laplace, propagacja dźwięku w ośrodku gazowym jest procesem izentropowym [7]. Oznacza to, że oscylująca cząstka gazu nie oddaje ani nie pobiera ciepła. Oscylacje ciśnienia przebiegają więc adiabatycznie, a zatem towarzyszą im również harmoniczne wahania temperatury. Należy tu rozważyć dwie możliwości: proces zachodzący w zamkniętej tubie akustycznej, gdzie przez odbicie powstaje fala stojąca oraz proces zachodzący w nieskończenie długim rezonatorze, gdzie występuje fala biegnąca. Fala stojąca w zamkniętym rezonatorze posiada węzeł ciśnienia i antywęzeł prędkości w środku tuby, co przedstawiono na rys. 2a. Ciśnienie i prędkość są zatem przesunięte w fazie o  $\varphi = \pi/2$ . W środkowym położeniu cząstka podlega największemu przemieszczeniu i osiąga maksymalną prędkość właściwie bez zmiany ciśnienia, co oznacza, że również temperatura się nie zmienia. Na krańcach rezonatora znajdują się z kolei węzły prędkości i antywęzły ciśnienia, co świadczy o tym, że cząsteczka prawie się nie porusza, natomiast ciśnienie i temperatura podlegają największym zmianom. Blisko węzła prędkości występuje zatem największy lokalny gradient temperatur.

W przypadku fali biegnącej ciśnienie i prędkość pozostają w fazie, tzn. podlegają tym samym zmianom jednocześnie. Jeśli założy się, że fala biegnąca propaguje w prawą stronę (rys. 2b), cząstka przesuwa się w prawo w wysokiej temperaturze, a w lewo w niskiej temperaturze. Ponieważ ciśnienie jest w fazie z prędkością, osiągnie ono maksimum i minimum w środkowym położeniu cząstki. Oznacza to, że przy przesuwaniu się w prawo od tego miejsca temperatura maleje wraz z ciśnieniem (przemiana adiabatyczna), aż do momentu gdy osiągnie minimum, po powrocie do środkowej pozycji. Stąd wykres zależności temperatury od położenia tworzy charakterystyczne koła. Fala dźwiękowa składa się zazwyczaj z komponentów fali biegnącej i fali stojącej. Wtedy wykres zależności temperatury od położenia cząstki przyjmuje bardziej kształt elipsy, której pochylenie jest zależne od komponentu fali stojącej i pozycji w rezonatorze.



Rys. 2. Oscylacje temperatury oraz przemieszczenia cząstki gazu na wykresie temperatura–położenie: a) dla fali stojącej, b) dla fali biegnącej, c) dla fali zawierającej komponenty fali biegnącej i stojącej

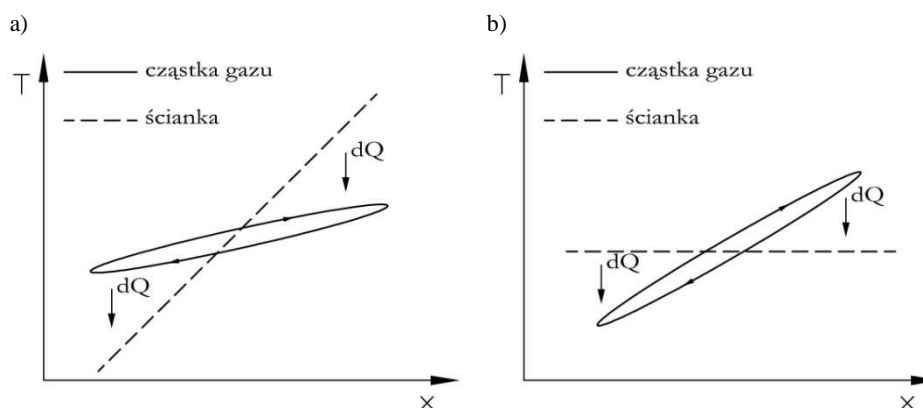
Fig. 2. Temperature and displacement oscillations of a gas parcel in the diagram of temperature–position for: a) standing wave, b) travelling wave, c) wave consisting of standing and travelling wave components

Zamieszczony opis dotyczył adiabatycznych procesów oscylacji cząstek gazu. Następnie należy rozważyć drgania cząstek wzdłuż ścianki ciała stałego, z którym wchodzą one w kontakt termiczny. Transport energii w postaci ciepła między gazem a ścianką generuje efekt termoakustyczny. Na tym zjawisku opierają się urządzenia termoakustyczne. Analizując propagację fali akustycznej wzdłuż ścianki, można wyróżnić dwa przypadki:

- *gradient temperatury jest znacznie większy niż gradient temperatury oscylującej cząstki gazu.* W tej sytuacji ciepło jest transportowane od ścianki do cząstki gazu po stronie cieplej oraz od cząstki do ścianki po stronie zimnej, jak przedstawiono na rys. 3a. Transport ciepła od źródła o wysokiej temperaturze do źródła o niskiej temperaturze powoduje wykonanie pracy. Tą pracą jest w tym wypadku zwiększenie amplitudy ciśnienia oscylacji gazu. W ten sposób fala akustyczna w urządzeniu ulega wzmocnieniu – wzrasta amplituda ciśnień. Parafrazując kryterium Rayleigha: ciepło jest dostarczane do gazu przy najwyższym ciśnieniu, a odbierane od niego przy najniższym ciśnieniu, co powoduje generowanie fali akustycznej, czyli konwersję energii cieplnej w pracę mechaniczną. Z punktu widzenia termodynamiki takie urządzenie jest nazywane silnikiem,
- *gradient temperatury wzdłuż ścianki jest mniejszy niż gradient temperatury gazu* (rys. 3b). Ciepło jest wówczas dostarczane od gazu do ścianki po stronie cieplej, a zabierane od ścianki do gazu po stronie zimnej.

W tym wypadku ciepło jest przenoszone od niskiej do wysokiej temperatury, dzięki energii fali akustycznej dostarczonej do układu. Jest to przykład klasycznego obiegu lewobieżnego, w którym dzięki dostarczonej do układu pracy można przetransportować ciepło z dolnego do górnego źródła ciepła. To urządzenie jest nazywane pompą ciepła [15].

Porównując zatem obydwa urządzenia: w silniku początkowo występuje gradient temperatur na regeneratorze, natomiast cząstka gazu, ogrzewając się z jednej i ochładzając z drugiej strony, zaczyna drgać. W pompie ciepła z kolei drgania cząstki są wywołane falą dźwiękową, co powoduje jej początkowy gradient temperatur. Ścianka regeneratora odbiera ciepło od cząstki w wysokiej temperaturze, a dostarcza w niskiej, dzięki czemu wzdłuż ścianki również pojawia się gradient temperatur.



Rys. 3. Wykres zależności temperatury od pozycji dla adiabatycznych oscylacji cząstki gazu oraz temperatury ścianki. Procesy wymiany ciepła: a) w silniku, b) w pompie ciepła. Strzałki wskazują kierunek transportu ciepła od gazu do ścianki lub odwrotnie

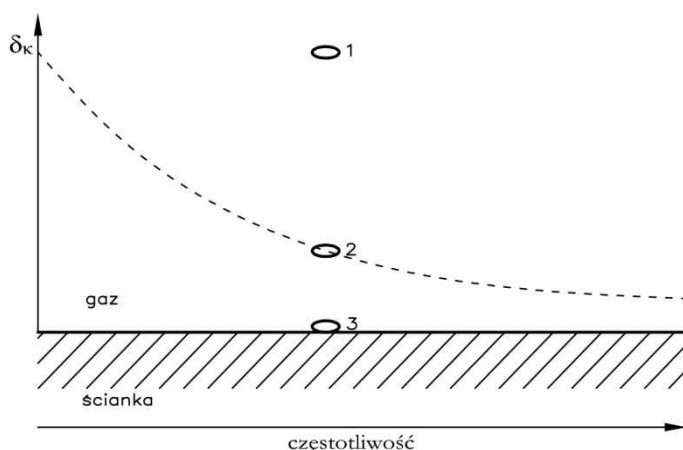
Fig. 3. The temperature–position diagram for the adiabatic parcel-temperature oscillations and the wall temperature. Diagrams show heat transfer processes: a) in engine, b) in heat pump. The arrows indicate the direction of heat transport from the gas to the wall and vice-versa

## 4. Obieg termodynamiczny

### 4.1. Konwersja energii cieplnej

Aby w urządzeniu termoakustycznym nastąpiła konwersja energii cieplnej na pracę lub odwrotnie, gaz musi podlegać obiegowi termodynamicznemu. Biorąc pod uwagę falę akustyczną, czyli ruch oscylacyjny gazu, przesunięcie fazowe między prędkością akustyczną a ciśnieniem akustycznym oraz średnica porów regeneratora mają kluczowe znaczenie. Swift [13] wykazał, że przemiany cząstki gazu w urządzeniu z falą stojącą opisuje obieg Braytona. Z kolei Ceperley [2] stwierdził, że skonstruowanie urządzenia z falą biegnącą pozwala na

osiągnięcie idealnego obiegu Stirlinga, co może zmniejszyć znacząco nieodwracalne straty systemu.



Rys. 4. Głębokość penetracji termicznej w funkcji częstotliwości (linia kreskowana); 1 – cząstka izotermiczna, 2 – cząstka przejściowa, 3 – cząstka adiabatyczna (na podstawie [11])

Fig. 4. Thermal penetration depth as a function of the frequency (dashed line); 1 – isothermal parcel, 2 – transition parcel, 3 – adiabatic parcel (on the basis of [11])

Aby gaz oscylujący w tubie zawierającej regenerator przeszedł obieg termodynamiczny, musi nastąpić wymiana ciepła między cząstką gazu a ścianką. Ich kontakt termiczny zależy bezpośrednio od ich wzajemnej odległości. Rysunek 4. przedstawia zależność głębokości penetracji termicznej gazu  $\delta_k$  wyrażonej wzorem (3) i częstotliwości kątowej. Fala propaguje w kierunku równoległym do ścianki, w tym samym kierunku oscylują również cząstki. Wykres dzieli się na trzy obszary. Cząstki oscylujące blisko ścianki przyjmują temperaturę ścianki, zatem sprężanie i rozprężanie gazu przebiegają izotermicznie. Gdy cząstki oscylują daleko od ścianki ( $>5\delta_k$ ), podlegają przemianom adiabatycznym. Cząstki „przejściowe” oscylują w odległości równej mniej więcej głębokości penetracji termicznej gazu. Niedoskonała wymiana ciepła w tym przypadku jest wykorzystywana do wykonania obiegu termodynamicznego przy fali stojącej. Penetracja termiczna gazu  $\delta_k$  maleje wraz ze wzrostem częstotliwości, co oznacza, że dla wyższych częstotliwości odległość cząstki od ścianki potrzebna do zainicjowania obiegu będzie mniejsza.

#### 4.2. Fala stojąca

Ciśnienie akustyczne przy fali stojącej jest przesunięte o  $\pi/2$  w fazie względem prędkości, osiąga zatem swoje maksimum i minimum przy maksymalnym wychyleniu cząstki, wtedy gdy prędkość jest zerowa. Gaz, przemieszczając się,



podlega naprzemiennie kompresji i ekspansji. Jak wspomniano wcześniej, odległość cząstki od ścianki ( $y$ ) ma wpływ na transport ciepła oraz realizację obiegu termodynamicznego. Można więc rozważyć trzy sytuacje:

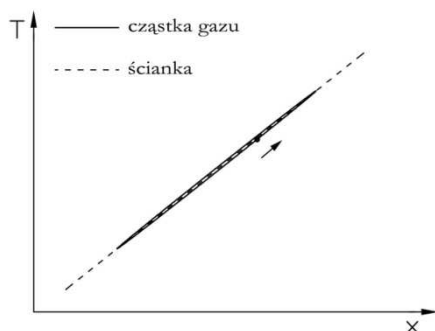
- *brak kontaktu termicznego* ( $y \gg \delta_k$ ). Cząstka znajduje się daleko od ścianki. Przy braku kontaktu termicznego między gazem a ciałem stałym cząstki gazu przechodzą sprężanie i rozprężanie adiabatyczne w sposób odwracalny, zatem transport ciepła nie zachodzi,
- *doskonały kontakt termiczny* ( $y \ll \delta_k$ ). Cząstka transportowana wzdłuż ścianki nagrzewa się, przemieszczając na stronę ciepłą i ochładza, przemieszczając na stronę zimną. Doskonała wymiana ciepła zapewnia, że cząstka przyjmuje temperaturę ścianki w danym miejscu. Gaz przechodzi przemiany odwracalne – spręża się wraz ze wzrostem temperatury i rozpręża wraz z jej spadkiem. Zmiany temperatury znajdują się w fazie ze zmianami ciśnienia, nie zachodzi zatem obieg termodynamiczny,
- *niedoskonały kontakt termiczny* ( $y \approx \delta_k$ ). Odległość cząstki gazu (w tym wypadku jest to cząstka przejściowa) od ścianki powoduje opóźnienie w czasie między ruchem cząstki a przejmowaniem ciepła. W rezultacie gaz przechodzi obieg termodynamiczny złożony z czterech przemian: kompresji, ogrzewania, ekspansji i ochładzania. Podczas przemieszczania się cząstka jest sprężana, lecz nie przejmuje idealnie ciepła od ścianki. Przy maksymalnym przesunięciu (najwyższe ciśnienie) cząstka nadal się ogrzewa, w przybliżeniu przy stałym ciśnieniu – przemiana izobaryczna. Wracając, cząstka jest rozprężana, po czym przy najniższym ciśnieniu jeszcze się ochładza.

W przypadku fali stojącej, aby zaistniał obieg termodynamiczny, konieczny jest nieidealny kontakt termiczny, a zatem większa średnica porów regeneratora. Taki regenerator jest nazywany stosem i zazwyczaj składa się z równolegle ułożonych płytek. Obieg termodynamiczny urządzenia termoakustycznego z falą stojącą składa się z dwóch izobar i dwóch przemian adiabatycznych – jest to zatem obieg Braytona. Energia akustyczna uzyskana podczas procesu jest równa polu wewnątrz obiegu na wykresie  $p$ - $V$ . Niedoskonały kontakt termiczny potrzebny do realizacji obiegu sprawia, że urządzenia z falą stojącą nie osiągają wysokiej sprawności. Urządzenia z falą biegnącą przechodzą obieg termodynamiczny przy prawie idealnej wymianie ciepła między gazem a ciałem stałym, dzięki czemu wykazują wyższą sprawność.

### 4.3. Fala biegnąca

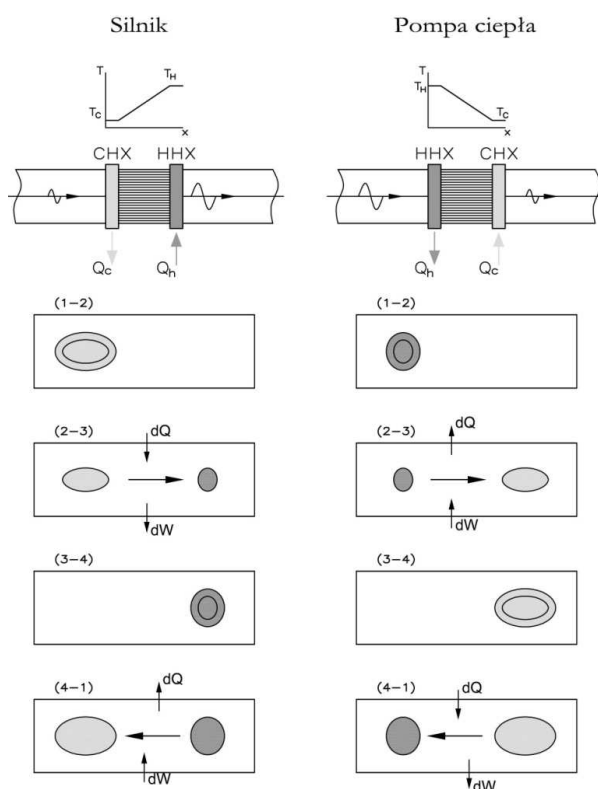
W przypadku fali biegnącej do zaistnienia obiegu potrzebny jest idealny kontakt termiczny między gazem a ciałem stałym, czyli  $y \ll \delta_k$ . Oznacza to, że w każdym miejscu regeneratora gaz przyjmuje prawie idealnie temperaturę ścianki – w przypadku silnika, lub ścianka przejmuje temperaturę gazu – w przypadku pompy ciepła. Stąd wykres przebiegu temperatury względem

przemieszczenia cząstki, przedstawiony na rys. 3., dla idealnego kontaktu termicznego będzie wyglądał jak na rys. 5. Według badań [17] optymalna średnica porów regeneratora powinna się zawierać między  $\delta_k/3$  a  $\delta_k/5$ .



Rys. 5. Przebieg zmiany temperatury cząstki gazu wzdłuż regeneratora względem położenia dla fali biegnącej

Fig. 5. The temperature variation of the gas parcel along the regenerator in relation to the traveling-wave



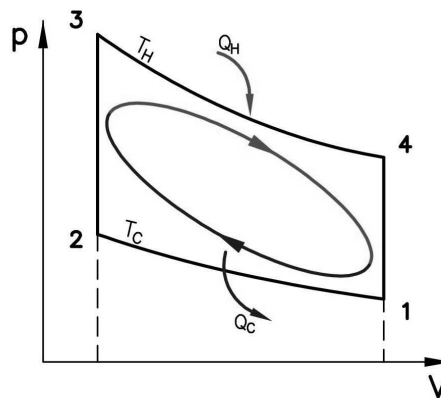
Rys. 6. Cztery przemiany cyklu termodynamicznego TAS w silniku i pompie ciepła: 1-2 – kompresja, 2-3 – ogrzewanie/ochładzanie, 3-4 – ekspansja, 4-1 – ochładzanie/ogrzewanie;  $dQ$  – ciepło wymieniane między cząsteczką gazu a regeneratorem,  $dW$  – praca sprężania i rozprężania. Jasny kolor odpowiada niższej, a ciemny wyższej temperaturze

Fig. 6. Four processes of TAS thermodynamic cycle in an engine and a heat pump: 1-2 – compression, 2-3 – heating/cooling, 3-4 – expansion, 4-1 – cooling/heating;  $dQ$  – heat transferred between a gas parcel and regenerator,  $dW$  – work of compression and expansion cycles. The light colour relates to lower, and the dark one to the higher temperature

W urządzeniu z falą biegnącą prędkość pozostaje w fazie z ciśnieniem, zatem najwyższe i najniższe wartości ciśnienia występują w środkowym położeniu cząstki. Przyjmuje się, że cząstka, przemieszczając się na stronę ciepłą, ogrzewa

się bez zmiany swojej objętości, po czym się rozpręża. Wracając w kierunku zimnej strony, cząstka oddaje ciepło do regeneratora, ochładzając się izochorycznie, po czym jest sprężana przy stałej temperaturze. Obieg składa się zatem z dwóch izochor i dwóch izoterm, czyli jest to klasyczny obieg Stirlinga. Trzeba tu zaznaczyć, że mała średnica porów regeneratora, zapewniająca idealny kontakt termiczny, może powodować straty lepkościowe. Z tego powodu urządzenia z falą biegnącą są projektowane tak, aby zwiększyć impedancję (5) w regenerators, czyli znacząco zmniejszyć prędkość.

Przemiany, którym podlega oscylująca cząstka gazu w pojedynczym cyklu obiegu prawo- i lewobieżnego zostały przedstawione na rys. 6. W silniku fala akustyczna sprawia, że cząsteczka gazu przechodzi kolejno przemiany: kompresji (1-2), ogrzewania (2-3), ekspansji (3-4) i ochładzania (4-1), poruszając się tam i z powrotem wzdłuż regeneratora. Proces dostarczania ciepła w wysokiej oraz odbierania w niskiej temperaturze zwiększa amplitudę ciśnienia akustycznego, a zatem wzmacnia falę dźwiękową. W ten sposób w silniku następuje konwersja energii cieplnej w akustyczną. W termoakustycznej pompie ciepła zachodzi odwrotny cykl niż w silniku – następuje tu konwersja energii akustycznej w energię cieplną. W przeciwieństwie do silnika w pompie ciepła kompresja gazu (1-2) następuje w wysokiej, a ekspansja (3-4) w niskiej temperaturze. Energią dostarczoną do układu jest w tym wypadku energia fali akustycznej, a uzyskanym efektem – różnica temperatur. Dlatego fala akustyczna podczas cyklu w regenerators osłabia się. Rysunek 7. przedstawia obieg termodynamiczny silnika termoakustycznego w układzie  $p$ - $V$ . Ponieważ cząstka gazu wykonuje ruch harmoniczny wzdłuż regeneratora, a jej oscylacje mają charakter sinusoidalny, wykres przyjmuje kształt elipsy ograniczonej przemianami charakterystycznymi teoretycznego obiegu Stirlinga. Pole elipsy jest równe wielkości wygenerowanej mocy (akustycznej).



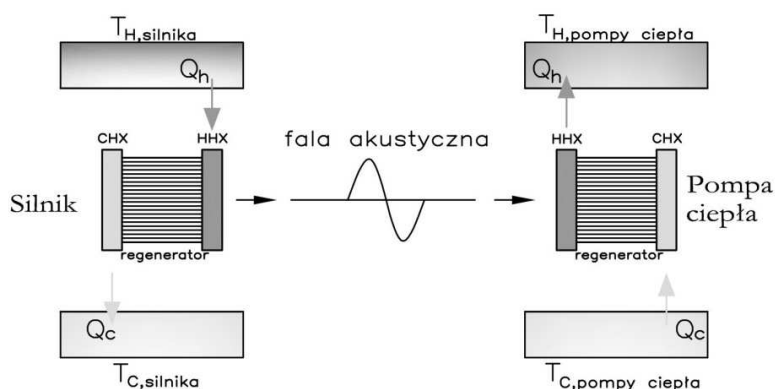
Rys. 7. Termodynamiczny obieg Stirlinga dla silnika termoakustycznego

Fig. 7. Thermodynamic Stirling cycle for a thermosacoustic engine

## 5. Konstrukcja

Urządzenie termoakustyczne w najprostszej formie składa się z wypełnionej gazem tuby zawierającej regenerator wraz z dwoma wymiennikami ciepła odbierającymi i dostarczającymi ciepło do krańców regeneratora. Od kształtu i wymiarów tuby (rezonatora) zależą parametry fali akustycznej propagującej przez układ wymienników z regeneratorem. Wymienniki ciepła: zimny i gorący mają za zadanie odebrać i dostarczyć ciepło do układu, w taki sposób, aby zapewnić stałą temperaturę krańcowych powierzchni regeneratora. Ponieważ gradient temperatur na regeneratorze jest kluczowym parametrem wpływającym na wzmocnienie fali akustycznej, zapewnienie odpowiedniej wymiany ciepła jest bardzo ważne. Aby wymienniki ciepła nie tłumily propagującej fali akustycznej, przy ich konstrukcji bierze się pod uwagę wymaganą przepuszczalność fali (ożebrowanie rurek, materiały porowate). Rolę regeneratora mogą spełniać: wełna metalowa, pianka metalowa lub ściśnięte ze sobą ekrany siatki drucianej zrobionej z drucików o bardzo małej średnicy (np. 65  $\mu\text{m}$ ). Jak już wspomniano, wymuszenie ustawienia się w fazie oscylującej prędkości i oscylującego ciśnienia cząstek gazu sprawia, że gaz w regeneratorze przechodzi w przybliżeniu termodynamiczny obieg Stirlinga. W odróżnieniu od klasycznego urządzenia, w którego działaniu wykorzystano obieg Stirlinga, urządzenie termoakustyczne z falą biegnącą, zwane termoakustycznym urządzeniem Stirlinga (TAS), nie posiada części ruchomych. Rolę tłoka odpowiedzialnego za cykliczne przemieszczenie gazu roboczego wzdłuż regeneratora pełni fala akustyczna.

Oprócz silnika i pompy ciepła, omówionych wcześniej, możliwe jest kompaktowe zastosowanie obu rozwiązań w celu bezpośredniej konwersji ciepła w chłód. Rozwiązanie to, nazywane urządzeniem hybrydowym, przedstawiono schematycznie na rys. 8. Urządzenie składa się z modułów regeneratora wyko-



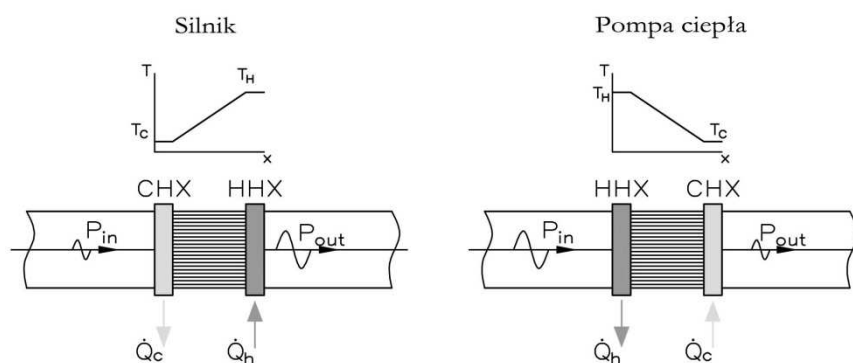
Rys. 8. Schemat układu hybrydowego z termoakustycznym silnikiem i pompą ciepła

Fig. 8. The scheme of a hybrid system with a thermoacoustic engine and a heat pump

nujących pracę silnika i pompy ciepła znajdujących się w jednej sieci akustycznej. Moduł silnika pełni rolę urządzenia generującego falę akustyczną, natomiast moduł pompy ciepła wykorzystuje dostarczoną falę do konwersji w ciepło. Należy zwrócić uwagę, że silnik i pompa ciepła pracują na innych zakresach temperatur, dlatego urządzenie hybrydowe można z powodzeniem stosować w celu chłodzenia [12].

### 6. Bilans energii

Z punktu widzenia termodynamiki, urządzenie termoakustyczne w całości charakteryzują strumienie odbieranego i dostarczanego ciepła (rys. 9.). Układ termoakustyczny przenosi energię między dwoma źródłami ciepła: górnym o temperaturze  $T_H$  i dolnym o temperaturze  $T_C$ . W silniku, przez dostarczenie ciepła  $Q_H$  z górnego źródła ciepła i oddanie ciepła  $Q_C$  jest wykonana praca, czyli następuje wzrost energii akustycznej ( $P_{out}-P_{in}$ ).



Rys. 9. Schemat bilansu energii dla sekcji silnika i pompy ciepła; CHX – zimny wymiennik ciepła, HHX – gorący wymiennik ciepła,  $Q_C$  – strumień ciepła o niskiej temperaturze,  $Q_H$  – strumień ciepła o wysokiej temperaturze,  $P_{in}$ ,  $P_{out}$  – moc na wejściu i wyjściu

Fig. 9. Scheme of energy balance in an engine and a heat pump; CHX – cold heat exchanger, HHX – hot heat exchanger,  $Q_C$  – low temperature heat flux,  $Q_H$  – high temperature heat flux,  $P_{in}$ ,  $P_{out}$  – input and output power, respectively

Ponieważ w urządzeniu termoakustycznym nie występuje przepływ masy, a jedynie oscylacyjny ruch gazu, system ten traktuje się jako układ zamknięty, dla którego pierwsza zasada termodynamiki przedstawia się następująco:

$$\frac{dU}{dt} = \sum \dot{Q} + \sum P \tag{5}$$

gdzie:  $\Delta U$  – zmiana energii wewnętrznej w czasie,  $\sum \dot{Q}$  i  $\sum P$  – odpowiednio suma strumieni ciepła wymianianych z otoczeniem oraz moc akustyczna dostarczana do układu lub odebrana z niego.

Ponieważ rozważa się stan ustalony, można przyjąć, że  $dU/dt = 0$ . Zatem dla silnika można napisać następujący bilans energii:

$$P_{out} - P_{in} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_C \quad (6)$$

Zakłada się, że w rezonatorze propaguje fala akustyczna o mocy  $P_{in}$ . Wzrost tej mocy na regeneratorze do wartości  $P_{out}$  jest równy różnicy między strumieniami dostarczanego i odbieranego ciepła:  $\dot{Q}_H - \dot{Q}_C$ . W sekcji regeneratora pełniącą rolę pompy ciepła to fala akustyczna wykonuje pracę, zatem jej moc osłabia się od wartości  $P_{in}$  do  $P_{out}$ , dzięki czemu jest możliwy transport ciepła ze źródła o niższej do źródła o wyższej temperaturze. Można zatem napisać:

$$P_{in} - P_{out} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_C \quad (7)$$

Warto zauważyć, że w pompie ciepła gradient temperatury ustala się odwrotnie wobec kierunku propagacji fali niż w silniku. Ponadto w wymienniku gorącym (HHX) ciepło jest odprowadzane z układu, a nie do niego dostarczane, jak ma to miejsce w silniku.

Wyznacznikami pracy obiegu termodynamicznego jest sprawność termiczna  $\eta_t$  dla silnika oraz współczynniki wydajności  $\varepsilon_{pg}$  i  $\varepsilon_{ch}$  dla pompy ciepła lub chłodziarki, zdefiniowane jako stosunek strumieni energii użytecznych do energii dostarczonych. Wyznacznikiem porównawczym dla każdego obiegu jest sprawność obiegu Carnota  $\eta_C$  lub  $\varepsilon_{pg(C)}$ . Określa ona maksymalną sprawność termodynamiczną dla idealnego urządzenia pracującego między źródłami ciepła o danej temperaturze. Sprawność rzeczywista jest mniejsza niż sprawność Carnota. Dla silnika cieplnego zatem:

$$\eta_t = \frac{P_{out} - P_{in}}{\dot{Q}_H} \leq \eta_C = \frac{T_H - T_0}{T_H} \quad (8)$$

a dla chłodziarki i pompy ciepła kolejno:

$$\varepsilon_{ch} = \frac{\dot{Q}_C}{P_{in} - P_{out}} \leq \varepsilon_{ch(C)} = \frac{T_C}{T_0 - T_C} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{pg} = \frac{\dot{Q}_H}{P_{in} - P_{out}} \leq \varepsilon_{pg(C)} = \frac{T_C}{T_0 - T_C} \quad (10)$$

Energia rozproszona podczas pracy silnika to głównie dodatkowe straty ciepła w urządzeniu. Zatem w przypadku silnika moc może być zdefiniowana jako iloczyn dostarczonego ciepła i sprawności Carnota, pomniejszony o wartość nazwaną ogólnie mocą strat  $P_{str}$  [14]:

$$P = \dot{Q}_H \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) - P_{str} \quad (11)$$

Pierwsza część prawej strony równania wyraża, w odniesieniu do I i II zasady termodynamiki, maksymalną moc, jaką może wygenerować idealny silnik. Różnicę między urządzeniem rzeczywistym a idealnym wyraża moc strat  $P_{str}$ . Podobnie w przypadku chłodziarki – potrzebna do napędu moc jest sumą mocy minimalnej (dla idealnego urządzenia) i mocy dodatkowej  $P_{str}$ :

$$P = \dot{Q}_C \frac{T_0 - T_C}{T_C} + P_{str} \quad (12)$$

Moc i sprawność każdego urządzenia cieplnego zależą od temperatury górnego i dolnego źródła ciepła. Stąd, przy małej różnicy temperatur sprawność Carnota też będzie niska. Aby zatem móc relatywnie ocenić efektywność urządzenia, należy wyznaczyć jego sprawność egzergetyczną  $\eta_E$ , czyli sprawność urządzenia w odniesieniu do sprawności Carnota dla takich samych wartości temperatury dolnego i górnego źródła ciepła, tj. [15]:

$$\eta_E = \frac{\eta}{\eta_C} \quad (13)$$

a dla chłodziarki i pompy ciepła:

$$\varepsilon_E = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{(C)}} \quad (14)$$

## 7. Podsumowanie

Praca urządzeń termoakustycznych z falą biegnącą opiera się na termodynamicznym obiegu Stirlinga, dzięki czemu osiągają one potencjalnie wysoką sprawność. Do napędu urządzeń TA może być wykorzystywane ciepło odpadowe o różnym zakresie temperatur (m.in. gazy wylotowe z silników albo ciepło z próżniowych kolektorów słonecznych) [4].

Urządzenia termoakustyczne znajdują wiele zastosowań w energetyce. Najbardziej oczywistym jest praca silnika termoakustycznego jako generatora mocy elektrycznej. Uzyskana w urządzeniu energia akustyczna jest konwertowana w energię elektryczną. Pulsacje ciśnienia i prędkości odbierane przez membranę mogą napędzać tłok poruszający magnes w alternatorze liniowym lub zostać zamienione na ruch obrotowy wirnika turbiny dwukierunkowej, co umożliwia wykorzystanie tradycyjnych obrotowych generatorów elektrycznych. Innym zastosowaniem może być wykorzystanie układu hybrydowego jako chłodziarki.

Uzyskany w sekcji chłodzącej spadek temperatury pozwala na zastosowanie takiego urządzenia na cele klimatyzacji, chłodzenia procesowego, a także zamrażania. Technologia termoakustyki pozwala również budować urządzenia do skraplania gazów. Przykładowa instalacja skraplania gazu ziemnego (LNG) została zademonstrowana w Los Alamos [16].

Termoakustyka oferuje obecnie wiele możliwości opracowania innowacyjnych rozwiązań w dziedzinie konwersji energii. Oczekuje się, że pierwsze rynkowe zastosowanie znajdzie się w tym obszarze, gdzie tradycyjne techniki konwersji z powodów ekonomicznych lub technicznych nie są zasadne. Kluczowe parametry systemów termoakustycznych to niska początkowa różnica temperatur pracy silnika i szybki wzrost mocy akustycznej wraz ze wzrostem różnicy temperatur. Urządzenia termoakustyczne mogą pracować wydajnie nawet przy niskiej różnicy temperatur ( $>80$  K). Dzięki temu technologia termoakustyczna może się stać konkurencyjna, jeśli chodzi o wykorzystanie niskotemperaturowych źródeł ciepła.

Dziedzina termoakustyki posiada duże perspektywy rozwoju, za czym przemawiają liczne zalety urządzeń termoakustycznych. Pierwszą z nich jest prosta budowa, następną zaś zastosowanie standardowych, łatwo dostępnych materiałów, dzięki czemu koszty urządzenia są relatywnie niskie. Urządzenia termoakustyczne nie posiadają części ruchomych. Zastąpienie tradycyjnych tłoków falą akustyczną powoduje znaczne obniżenie kosztów konserwacji i eksploatacji urządzeń oraz wydłużenie jego żywotności. Gazy robocze układów termoakustycznych (powietrze, gazy szlachetne) są nieszkodliwe dla środowiska. Dodatkową zaletą jest możliwość wykorzystania różnych źródeł ciepła o szerokim zakresie temperatur.

## Literatura

- [1] Backhaus S., Swift G.W.: A thermoacoustic Stirling heat engine: detailed study, *J. Acoustical Soc. America*, 107 (2000), 3148-3166.
- [2] Ceperley P.H.: A pistonless Stirling engine – the travelling wave heat engine, *J. Acoustical Soc. America*, 66 (1979), 1508-1513.
- [3] Ceperley P.H.: Gain and efficiency of a short travelling wave heat engine, *J. Acoustical Soc. America*, 77 (1985), 1329-1344.
- [4] de Blok C.M.: Low operating temperature integral thermoacoustic devices for solar cooling and waste heat recovery, *Acoustics*, Paris 2008, 3545-3550.
- [5] de Blok C.M.: Multi-stage travelling wave thermoacoustics in practice, 19th Int. Congress Sound Vibration, Vilnius 2012.
- [6] de Blok C.M.: Thermoacoustic system, Dutch Patent, Int. Application Number PCT/NL98/00515, 1998.
- [7] Laplace S.: Equations of nonlinear acoustics, *Ann. Chemie Physique*, 3 (1816), 328.
- [8] Makarewicz R.: *Dźwięki i fale*, Wydawn. Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań 2004.



- [9] Rayleigh Lord: The explanation of certain acoustical phenomena, *Nature (Lond)*, 18 (1878), 319-321.
- [10] Rott N.: Thermoacoustics, *Adv. Appl. Mech.*, 20 (1980), 135-175.
- [11] Shutte A.: Thermoacoustics: Numerical modelling and experimental validation, Master's thesis, University of Twente, Enschede 2009.
- [12] Spoelstra S., Tijani M.E.H.: Thermoacoustic heat pumps for energy savings, ECN-RX-05-159, Seminar Boundary crossing acoustics, Netherlands 2005.
- [13] Swift G.W.: Thermoacoustic engines, *J. Acoustical Soc. America*, 84 (1988), 1146-1180.
- [14] Swift G.W.: Thermoacoustics: a unifying perspective for some engines and refrigerators, *Acoustical Society of America*, Los Alamos 2002.
- [15] Wilhelmus in't panhuis P.H.M.: Mathematical Aspects of Thermoacoustics, PhD thesis, The Eindhoven University of Technology, 2009.
- [16] Wollan J.J., Swift G.W., Backhaus S., Gardner D.L.: Development of a thermoacoustic natural gas liquefier, *AiChe New Orleans Meeting*, New Orleans 2002.
- [17] Yu Z., Li Q., Chen X., Guo F.Z., Xie X.J.: Study on the optimal characteristic dimension of regenerator in a thermoacoustic engine, *Proc. 20th Int. Cryogenic Eng. Conf. ICEC20*, 2005, 357-360.

## ANALYSIS OF ENERGY CONVERSION PROCESSES IN A THERMOACOUSTIC DEVICE

### Summary

Thermoacoustic devices (TA) operation are based on thermoacoustic effect, described by Rayleigh in XIX century. With the temperature difference high enough along an acoustic tube, gas starts to oscillate spontaneously producing sound. The performance of TA devices with the travelling wave is based on the thermodynamic Stirling cycle. The thermoacoustic engine resembles in its construction the conventional Stirling engine – it uses regenerator placed between hot and cold heat exchangers. Mechanical energy achieved by oscillatory compression and expansion of the gas parcels is the energy carried by a sound wave, which in this case replaces work of a piston. Hence, in TA devices thermal energy is converted into acoustic energy (engines) or acoustic energy into thermal energy (heat pumps). TA devices are very simple in construction and have no moving parts. The aim of this article is to introduce the principle of thermoacoustic devices and related to it energy conversion processes. The process of energy dissipation on the TA regenerator as well as the thermodynamic cycle of the TA device, considering the gas oscillations, is being analysed. It is presented, how the gas parcel undergoes the cycle, and how the thermal contact between the parcel and the solid influences the process. The conditions needed for the occurrence of the thermoacoustic effect for the travelling wave and standing wave phasing are also discussed. Finally, the energy balance of the device and application perspectives are presented.

**Keywords:** thermoacoustics, thermodynamic cycle, Stirling cycle, acoustic wave energy

DOI: 10.7862/rm.2015.15

*Otrzymano/received: 14.09.2014 r.*

*Zaakceptowano/accepted: 20.02.2015 r.*