



---

---

## Wymiana ciepła w urządzeniach termoakustycznych – przegląd stosowanych rozwiązań

AUTORZY: Adam Ruziewicz<sup>a\*</sup>, Paweł Zimnowłodzki  
REKOMENDOWANE PRZEZ: Zbigniew Gnutek

<sup>a</sup> Zakład Termodynamiki, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Politechnika Wroclawska

\* Adres do korespondencji: adam.ruziewicz@pwr.edu.pl, tel. 71 320 30 91

---

### STRESZCZENIE

Termoakustyka to rozwijana obecnie dziedzina zajmująca się urządzeniami wykorzystującymi efekt termoakustyczny – konwersję energii cieplnej w akustyczną lub energii akustycznej w ciepłą. Efekt ten wykorzystywany jest zarówno w silnikach, jak i chłodziarkach. Jednym z najważniejszych zagadnień konstrukcyjnych tych urządzeń są wymienniki ciepła. Od efektywności przekazywania ciepła zależy sprawność całego procesu zachodzącego w urządzeniu termoakustycznym. Ze względu na niewielkie rozmiary urządzenia oraz wymagania związane z propagacją fali akustycznej konstrukcja optymalnego wymiennika jest skomplikowana. W artykule została zaprezentowana problematyka wymiany ciepła w urządzeniach termoakustycznych oraz przegląd stosowanych dotychczas rozwiązań.

**SŁOWA KLUCZOWE:** *urządzenia termoakustyczne, wymienniki ciepła, silnik Stirlinga*

---

## 1. WPROWADZENIE

### 1.1. URZĄDZENIE TERMOAKUSTYCZNE

Termoakustyczny silnik ciepły Stirlinga konwertuje ciepło na zintensyfikowaną moc akustyczną w prostym urządzeniu, składającym się z tuby akustycznej zawierającej wymienniki ciepła i regeneratory, które nie posiadają żadnych części ruchomych. Urządzenie to wykorzystuje efekt termoakustyczny opisany przez Rayleigha już w 1896 roku [1]. Zjawisko to polega na tym, że naprzemienne sprężanie i rozprężanie gazu może wywołać falę akustyczną, jeśli ciepło będzie dostarczane do gazu przy wysokim ciśnieniu, a odbierane przy niskim ciśnieniu. Prawdziwa jest również implikacja odwrotna: fala akustyczna może spowodować oscylującą kompresję i ekspansję termiczną gazu, gdy wzdłuż kanału występuje różnica temperatur. Zasada pracy urządzenia jest podobna do działania tłokowego silnika Stirlinga. Gaz przetłaczany jest

przez regeneratory (strukturę porowatą o wysokiej pojemności cieplnej), który magazynuje ciepło odebrane od gazu, by przekazać je z powrotem przy przepływie gazu w drugą stronę. Ciepło dostarczane jest do układu w nagrzewnicy i chłodnicy umieszczonych po dwóch stronach regeneratora. Naprzemienne sprężanie i rozprężanie czynnika powoduje ruch tłoka. W urządzeniu termoakustycznym rolę tłoka pełni fala akustyczna. Powoduje ona oscylacje gazu wzdłuż regeneratora, na którego jednym końcu dostarczane jest ciepło w nagrzewnicy (HHX), a na drugim odbierane w chłodnicy (CHX). Fenomen efektu termoakustycznego polega na tym, że wytworzona w ten sposób różnica temperatur może wygenerować, a także wzmocnić falę dźwiękową – pod warunkiem, że układ wymienników ciepła wraz z regeneratorem znajdują się w tubie akustycznej.

Moc akustyczna może być wykorzystana bezpośrednio w akustycznych chłodziarkach lub tubach pulsacyjnych (konwersja energii akustycznej w ciepłą), lub w celu generowania energii elektrycznej przy pomocy alternatora liniowego lub innego elektroakustycznego przetwornika mocy.

## 1.2. WYMIANA CIEPŁA

Jednym z głównych problemów projektowych związanych z budową i funkcjonowaniem urządzeń termoakustycznych jest wymiana ciepła. Zimny i gorący wymiennik ciepła współpracujące z regeneratorem są podstawowymi elementami potrzebnymi do realizacji obiegu termodynamicznego w silniku. Wymiary wymienników ciepła zależą bezpośrednio od średnicy tuby akustycznej, w której mają być umieszczone. Średnica standardowych rezonatorów urządzeń prototypowych wynosi 60-100 mm. Na tak małej powierzchni problemem jest dostarczenie dużych ilości ciepła. W zależności od temperatury źródła w urządzeniach prototypowych jest to 300-700 W. W celu uzyskania większej mocy akustycznej, w urządzeniu można zastosować więcej sekcji wymienników wraz z regeneratorem, według koncepcji urządzeń wielosekcyjnych zaproponowanej przez Keesa de Bloka [2].

W silnikach i chłodziarkach dużej mocy możliwe jest stosowanie istniejących już rozwiązań i „katalogowy” dobór wymienników ze względu na parametry pracy. Mała moc odbieranego ciepła i związane z tym niewielkie gabaryty przewodu akustycznego stanowią wyzwanie konstrukcyjne ze względu na potrzebę znalezienia kompromisu pomiędzy dużą powierzchnią wymiany ciepła, a niskim tłumieniem fali akustycznej. Z drugim parametrem związana jest konieczność zachowania odpowiedniej porowatości zespołu wymiennikowo-regeneracyjnego. Poszukiwane jest optymalne rozwiązanie spełniające wymienione wymagania.

## 2. PROBLEMATYKA WYMIANY CIEPŁA

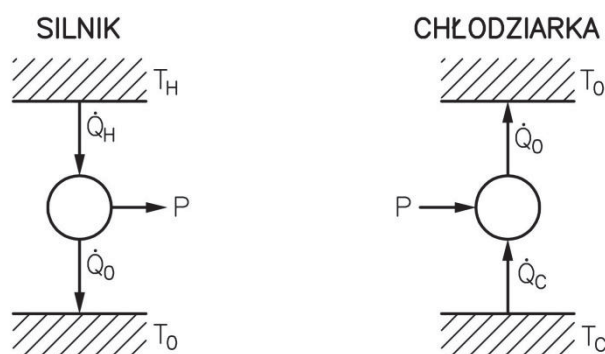
Wymiana ciepła jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na pracę urządzeń termoakustycznych. Od efektywności dostarczania i odbierania ciepła (w górnym i dolnym źródle ciepła) zależy bezpośrednio sprawność całego procesu.

W idealnym przypadku bilans energii silnika wyglądałby następująco:

$$\dot{Q}_H - \dot{Q}_C = P \quad (1)$$

Natomiast bilans energii chłodziarki:

$$\dot{Q}_C + P = \dot{Q}_0 \quad (2)$$



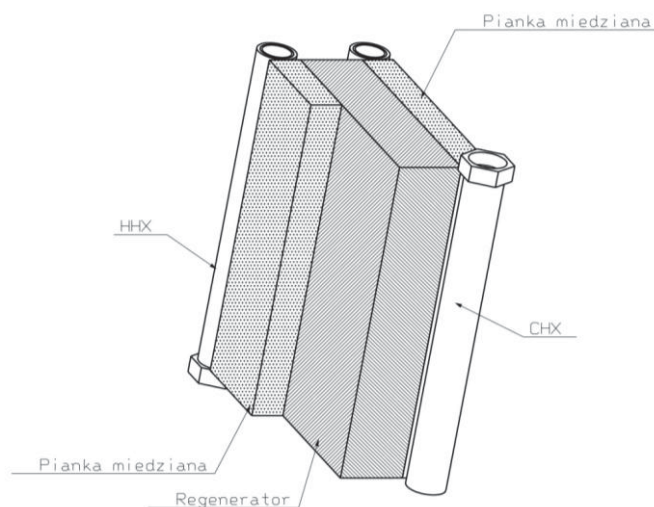
Rys. 1. Bilans energii prostego silnika i chłodziarki;  $T_H$  – temperatura górnego źródła ciepła,  $T_C$  – temperatura dolnego źródła ciepła,  $T_0$  – temperatura otoczenia

Jednakże w rzeczywistym urządzeniu występują duże straty ciepła. Realna ilość ciepła dostarczona do płaszczyzny regeneratora jest zatem dużo mniejsza. Ponieważ czynnikiem napędzającym efekt termoakustyczny jest różnica temperatur między krańcami regeneratora, ważnym zadaniem jest zapewnienie jak najwyższej temperatury na jego płaszczyźnie – od strony cieplej – i jak najniższej na płaszczyźnie po stronie zimnej. Tym samym, celem jest zmniejszenie strat ciepła między wymiennikiem ciepła, a powierzchnią regeneratora.

Typowy silnik termoakustyczny charakteryzuje prosta budowa. Pomiędzy modułami regeneratorów wraz z wymiennikami ciepła znajduje się rezonator w postaci zapętlonej rury o odpowiedniej do zapewnienia wymaganych parametrów fali dźwiękowej długości i średnicy. Do montowanych modułów doprowadzane są strumienie cieczy oddającej ciepło w HHX i odbierającej ciepło w CHX. Elementami o najbardziej skomplikowanej budowie są właśnie wymienniki ciepła i dlatego na zagadnienie efektywnej wymiany ciepła zwrócona jest uwaga pomysłodawców i konstruktorów urządzeń termoakustycznych.

Projektowanie wymienników współpracujących z regeneratorem urządzenia termoakustycznego jest problematyczne, gdyż wymaga uwzględnienia wielu czynników i ograniczeń. Jednym z nich są wymiary. Zaprojektowany wymiennik powinien mieścić się w module, a jego powierzchnia musi odpowiadać powierzchni regeneratora. Ponieważ celem wymiany ciepła jest utrzymanie temperatury powierzchni bocznej regeneratora na stałym poziomie, wymiar wzdłużny (tj. w kierunku przebiegu fali

akustycznej) wymiennika nie ma dużego znaczenia. Kolejnym aspektem jest przepuszczalność fali akustycznej i umożliwienie drgań cząsteczek gazu wzdłuż regeneratora. Idealny wymiennik ciepła powinien być wykonany z materiału maksymalnie porowatego (tak jak regenerator) przy jak największej jego przewodności cieplnej. Problemem jest jednak przekazanie ciepła od czynnika do materiału porowatego. Odpowiednim rozwiązaniem byłoby umieszczenie rurek z przepływającym czynnikiem w materiale porowatym (np. spienionej miedzi), który spełniałby rolę żeber zapewniających lepszą wymianę ciepła i bardziej równomierny rozkład temperatur. Rurki należy jednak umieścić w taki sposób, aby odległości między nimi umożliwiały propagację fali akustycznej. Napotkaną tutaj trudnością jest skala wielkości urządzenia. Przykładowo regenerator chłodziarki termoakustycznej [3] mierzy około 100 x 100 mm. Dla tak niewielkiej powierzchni wymiany ciepła nie każde rozwiązanie jest możliwe do wykonania. Chcąc spełnić wszystkie kryteria trzeba zastosować rurki miedziane o możliwie małej średnicy, aby zoptymalizować powierzchnię wymiany ciepła do powierzchni porowatej między rurkami. W przypadku gięcia rurek lub zastosowania kolanek i trójników ograniczeniami są wymiary standardowych elementów oraz minimalny promień gięcia rurki.



Rys. 2. Moduł złożony z dwóch wymienników ciepła (HHX i CHX) i regeneratora pośrodku (pierwszy wymiennik pokazany w przekroju)

Ciepło może być transportowane na trzy sposoby: przewodzenia, promieniowania i konwekcji. Przy projektowaniu wymiennika należy zastanowić na które z wymienionych sposobów wymiennik będzie oddawał (HHX) lub przyjmował (CHX) ciepło. Moduły zbudowane są zazwyczaj w ten sposób, że regenerator jest ściśnięty między dwoma wymiennikami ciepła. Przykładowy schemat pokazany jest na rys. 2. W przy-

padku zastosowania porowatego ciała stałego jako materiału wymiennika, powierzchnie wymiennika i regeneratora stykają się, dlatego wymiennik przekazuje ciepło do regeneratora na sposób przewodzenia. Przy niskich temperaturach roboczych (temperatura górnego źródła ciepła 160 °C) promieniowanie jest pomijalnie małe. Dodatkowo brak jest ośrodka w którym następowaloby promieniowanie jednej powierzchni na drugą – wymiennik jest dociśnięty do powierzchni regeneratora.

Aby ciepło było przekazywane na sposób konwekcji wymuszonej potrzebny jest przepływ obydwu płynów wymieniających ciepło między sobą. Jednakże w gazie wypełniającym rezonator przepływ z założenia nie występuje. Jeśli występuje, oznacza to spadek sprawności urządzenia. Jedynym pożądanym ruchem gazu są drgania o znanej amplitudzie. Drgająca cząsteczka na skutek różnicy temperatur w regeneratorsze realizuje w przybliżeniu obieg Stirlinga. Niełatwym problemem jest jednak stwierdzenie, jaki wpływ mają same oscylacje na transport ciepła z objętości wymiennika ciepła do regeneratora. W idealnym przypadku, wymiana ciepła między regeneratorem i gazem jest doskonała, zatem cząsteczka ma w danym punkcie taką samą temperaturę jak regenerator. Zagadnienie to pozostaje otwarte do rozważań teoretycznych oraz doświadczalnych. Drugą możliwością jest transport ciepła poprzez konwekcję swobodną gazu opływającego przestrzeń wymiennika ciepła i pory regeneratora.

Przy projektowaniu wymienników ciepła, podstawowymi danymi są temperatura wlotu do wymiennika  $T_1$  oraz strumień przepływu  $q_v$ , który można regulować. Przy założonym strumieniu ciepła doprowadzanego  $\dot{Q}$  można obliczyć temperaturę wylotową z wymiennika  $T_2$  lub odwrotnie – znając tę temperaturę można obliczyć doprowadzane ciepło. Aby uzyskać jak najlepszy efekt pracy urządzenia, należy dostarczyć (odebrać) jak najwięcej ciepła. Głównym ograniczeniem w omawianym przypadku jest mała powierzchnia wymiany ciepła. Strumień ciepła doprowadzonego będzie największy przy największym możliwym przepływie i największej różnicy temperatury na wlocie i wylocie, zgodnie ze wzorem:

$$\dot{Q} = q_v \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Parametrem, który ogranicza maksymalne obniżenie temperatury  $T_2$  na wylocie jest temperatura powierzchni regeneratora  $T_R$ . Rozważając działanie HHX, osiągnięta  $T_R$  powinna być jak największa, przy czym jest ona zawsze mniejsza od  $T_2$ . Z tego powodu różnica temperatur na wlocie i wylocie wymiennika ( $T_1 - T_2$ ) nie może być zbyt duża. Optymalizacja pracy zaprojektowanego wymiennika polega na dobraniu takich parametrów, aby przy wysokiej temperaturze regeneratora oddawane ciepło było maksymalnie duże.

### 3. WYMIENNIKI CIEPŁA - PRZEGLĄD STOSOWANYCH ROZWIĄZAŃ

Znaczenie i funkcja wymienników ciepła w urządzeniu termoakustycznym zostały opisane powyżej. Dwoma najistotniejszymi czynnikami branymi pod uwagę podczas ich projektowania są: efektywność wymiany ciepła (pomiędzy nośnikiem ciepła

a wymiennikiem i między wymiennikiem a regeneratorem) oraz zapewnienie możliwości swobodnej propagacji fali akustycznej.

Wytwarzanie coraz doskonalszych wymienników ciepła może zapewnić ogromną poprawę efektywności, trwałości oraz obniżenie kosztów produkcji urządzeń termoakustycznych. Wszystkie silniki i chłodziarki mają za zadanie usuwać zbędne ciepło do otoczenia. Silniki muszą również pobrać ciepło od źródła przy wyższej temperaturze, np. strumień spalin z kotła. Chłodziarki muszą natomiast odbierać ciepło, przy niskich temperaturach, od wkładu, który może również mieć postać strumienia masy. Wśród przykładów można wymienić klimatyzację powietrza, w której strumień powietrza jest osuszany i ochładzany, albo strumień schładzanego, a następnie skraplanego gazu w skraplarkach. Zatem typowy wymiennik ciepła w urządzeniach termoakustycznych ma za zadanie przenosić ciepło pomiędzy stabilnie przepływającym płynem roboczym, a oscylującym wewnątrz tuby akustycznej gazem roboczym (najczęściej stosowanym jest sprężony hel).

Istotnym mankamentem wymienników ciepła wykorzystywanych w silnikach i chłodziarkach termoakustycznych jest fakt, iż ciepły i zimny wymiennik przylegające do przeciwległych końców jednego regeneratora – mającego do kilku centymetrów grubości – są umieszczone bardzo blisko siebie. Uzyskiwany przez to efekt można wytłumaczyć posługując się przykładem typowej lodówki. W chłodziarce sprężarkowej możliwa jest duża dowolność w doborze geometrii zarówno zimnego wymiennika ciepła, w którym odbierane jest ciepło z wnętrza chłodziarki, jak również ciepłego wymiennika – znajdującego się zazwyczaj z tyłu – oddającego ciepło do otoczenia. Znajdująca się pomiędzy wymiennikami izolacja umożliwia optymalne dostosowanie ich kształtu w zależności od potrzeb. Ta elastyczność w projektowaniu geometrii jest niemożliwa ze względu na niewielką odległość HEX od siebie. Z powyższego wynika wymóg zastosowania większej ilości przewodów dostarczających czynnik roboczy, co powoduje zwiększenie stopnia skomplikowania oraz kosztów wykonania.

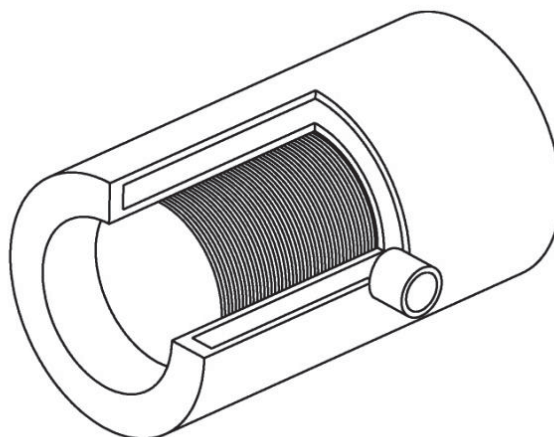
W urządzeniach dużej mocy, przewodność cieplna materiałów, z których zbudowany jest wymiennik jest niewystarczająca do zapewnienia transportu wymaganej ilości ciepła bez znacznej różnicy temperatur. Z tego powodu wymagane jest stosowanie kształtów o skomplikowanej geometrii, w których zapewniony jest dobry kontakt termiczny obydwu płynów. Z kolei w urządzeniach małej mocy, ale pracujących na przy dużo niższej różnicy temperatury (rzędu 100-150 K), niezbędne jest zapewnienie jak największej powierzchni wymiany ciepła w stosunku do objętości wymiennika. Wielkością opisującą stopień rozwinięcia powierzchni jest jej stosunek do objętości zajmowanej przez elementy wymieniające ciepło. Przyjmuje się, że przy połączeniu gaz-płyn, wymiennikami kompaktowymi są takie, w których relacja ta jest nie mniejsza niż  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  [4]. Tak zaawansowane konstrukcyjnie struktury przeplatających się strumieni masy, przy zapewnieniu ich rozdzielności, można porównać do struktury włókien tkaniny czy plecionej wikliny.

W pierwszych prototypach silników termoakustycznych rolę wysokotemperaturo-



wego wymiennika ciepła pełniła nagrzewnica elektryczna skonstruowana z drutu oporowego, nawiniętego na nieprzewodzące pręty umieszczone poprzecznie w stosunku do kanału. Możliwość uzyskania pola temperatury o praktycznie równym rozkładzie oraz dokładnego określenia ilości dostarczonego ciepła pozwalała na określenie sprawności TAS. Rozwiązanie to miało jednak tylko zastosowanie do celów badawczych. Za odprowadzanie ciepła z zimnego końca regeneratora odpowiadały radiatory.

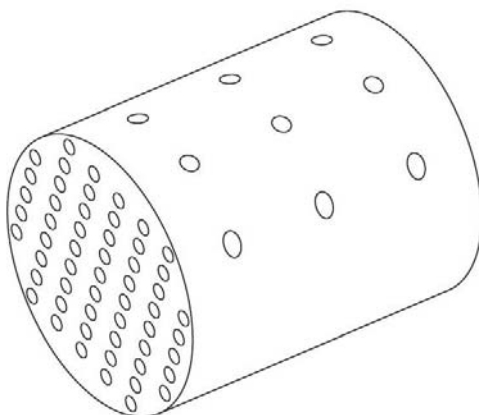
W zdecydowanej większości pierwszych konstrukcji były to ożebrowane struktury oddające ciepło do powietrza. W celu zintensyfikowania wymiany ciepła zaczęto stosować wymienniki opływane cieczą chłodzącą. Wśród przykładów można podać CHX wykonany z ułożonych wielowarstwowo krążków z siatki miedzianej umieszczonych w miedzianej rurce, opływanej z zewnątrz przez wodę (rys. 3) [5].



Rys. 3. Płaszczowo-rurowy wymiennik ciepła z wkładem z ułożonej wielowarstwowo siatki miedzianej

Najbardziej rozpowszechnionym typem opisywanym w literaturze jest wymiennik płaszczowo-rurowy. W takim rozwiązaniu wzdłuż wielu umieszczonych szeregowo rurek oscyluje gaz (równoległe do sieci akustycznej), podczas gdy czynnik opływający rurki w poprzek dostarcza lub odbiera ciepło. Charakterystyczne cechy silników i chłodziarek, w których czynnikiem roboczym jest oscylujący gaz, powodują niekorzystne zmiany w funkcjonowaniu wymienników ciepła (HEX) przy skalowaniu ich do większych mocy. Powoduje to potrzebę przenoszenia dużych ilości ciepła, co z kolei – przy zachowaniu podobnej sprawności – wymaga dużej powierzchni wymiany ciepła. Jednakże długość rurek nie może być zwiększona, ponieważ spowodowałoby to znaczne zmniejszenie efektywności przenoszenia ciepła przez cząsteczki oscylującego gazu. Stąd, w celu zwiększenia powierzchni wymiany ciepła, jedyną możliwością jest zwiększenie liczby rurek proporcjonalnie do mocy, przy stałej długości i przekroju każdej rurki. Takie wymienniki musiałyby posiadać setki tysięcy rurek,

powodując przy tym wzrost kosztów produkcji (wiele części musi być pasowanych, umieszczanych i łączonych razem) oraz nietrwałość ze względu na dużą ilość połączeń – miejsc najbardziej narażonych na uszkodzenia związane z naprężeniami spowodowanymi zmianami temperatur.

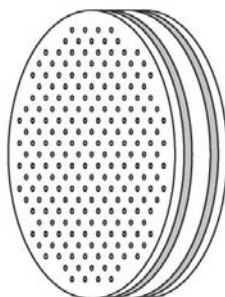


Rys. 4. Nawiercany dwukierunkowo walcowaty wymiennik ciepła

Rozwiązaniem podobnym do opisanego powyżej, jednakże bardziej zaawansowanym, a co za tym idzie bardziej skomplikowanym technologicznie, jest wymiennik, w którym kanały odpowiadające za transportowanie nośnika ciepła oraz umożliwiające oscylacje gazu, są nawiercone w metalowym walcu. Okrągły kształt przekroju poprzecznego wynika z właściwości sieci akustycznej oraz kształtu przewodów akustycznych. Wymienniki takie posiadają otwory przebiegające prostopadle, jednak nieprzecinające się wzajemnie tak, aby zachować przepływ krzyżowy obydwu płynów. Jednym z przykładów jest, powstały w LANL, wymiennik zimny wykonany z aluminiowego walca (rys. 4), zawierającego 45 otworów dla przepływu (drgań) gazu oraz 12 dla wody chłodzącej [6]. Wadą powyższej metody jest wysoki koszt wykonania z uwagi na dużą ilość materiału (dobrze przewodzący metal np. aluminium, miedź) w stosunku do powierzchni wymiany ciepła (powierzchnia wnętrza otworów) oraz kosztowną technikę wiercenia CNC.

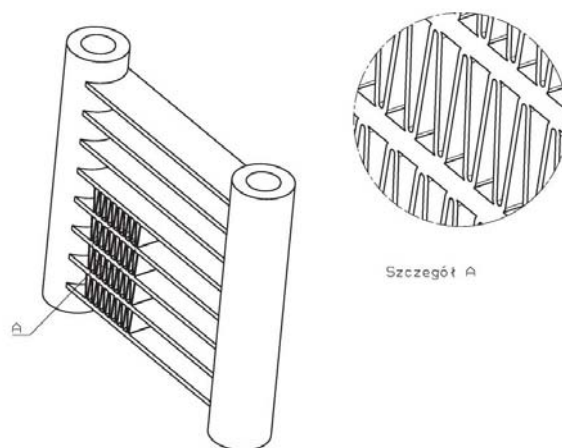
Wykonany podobną metodą w ECN (Energy Research Centre of the Netherlands) wymiennik ciepła z 20 mm grubości aluminiowego cylindra (rys. 5), miał wzdłuż osi nawierconych 228 otworów o średnicy 1.5 mm, natomiast ciepło od niego było odbierane przez wodę opływającą go dookoła w pierścieniowatych kanałach [7].





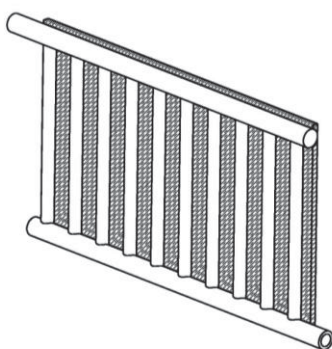
Rys. 5. Nawiercany wymiennik ciepła z kanałami na obwodzie walca

W chłodzarce Keesa de Bloka do zapewnienia wymiany ciepła wykorzystywane są nagrzewnice powietrza rozpowszechnione w przemyśle motoryzacyjnym (rys. 6). Transport ciepła między cieczą a gazem jest zapewniony w nich dzięki równoległym kanałom, przez które przepływa ciecz oraz umieszczonym pomiędzy nimi żebrami w kształcie ściśniętej sinusoidy. Niewielkie kwadratowe kanały o szerokości mniejszej niż 1.5mm są ustawione jeden na drugim tworząc tym samym przekrój wydłużonego prostokąta z rozdzielonymi poszczególnymi kanałami. Kilka równomiernie rozmieszczonych równoległych „pakietów” zapewnia zarówno równomierny rozkład temperatury oraz tworzy szkielet nośny dla żeber. Gaz drgając pomiędzy żebrami odbiera bądź oddaje ciepło. Problemem opisanego rozwiązania jest niedostateczna powierzchnia kontaktu pomiędzy regeneratorem, a wymiennikiem co przyczynia się do dużego spadku temperatury (ok. 15 K) na styku pomiędzy nimi.

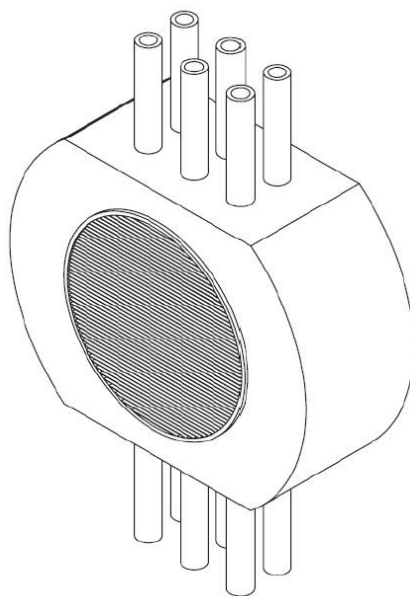


Rys. 6. Wymiennik ciepła typu „chłodnica samochodowa”

Modyfikacją uwzględniającą równomierny gradient temperatury oraz dobrą przewodność cieplną jest połączenie pianki miedzianej z przylutowanymi do niej miedzianymi rurkami ułożonymi równolegle w układzie Tichelmana (rys. 7). Zaletą takiego rozwiązania, w przeciwieństwie do poprzedniego, jest zapewnienie dużej powierzchni styku oraz wydajny transport ciepła pomiędzy regeneratorem i wymiennikiem. Problem stanowi jednak wymagana duża dokładność wykonania połączenia rurek z pianką (lutowanie) oraz niewielka powierzchnia styku pomiędzy nimi, powodująca duże opory przewodzenia ciepła między rurką a pianką.

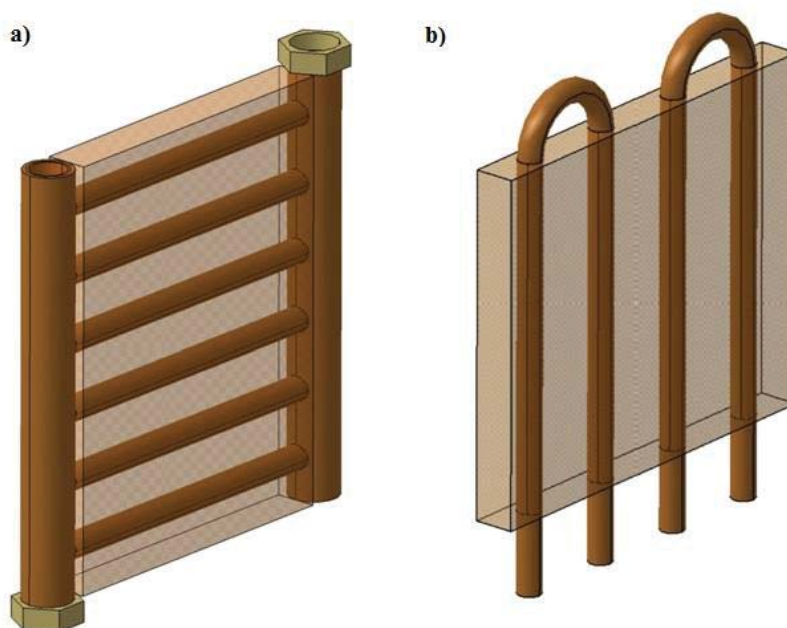


Rys. 7. Wymiennik ciepła o przepływie równoległym z pianką miedzianą



Rys. 8. Wymiennik ciepła typu lamelowego [8]

Kolejnym rozwiązaniem wykorzystującym ożebrowanie rurek jest wymiennik typu lamelowego [8] przedstawiony na rysunku 8. W tej konstrukcji 6 stalowych rurek przechodzi przez szereg blaszek stalowych (tzw. lameli). Ciasne dopasowanie rurek i lameli zwiększa efektywność wymiany ciepła przez przewodzenie. Rozwiązanie to przypomina swoją konstrukcją przedstawioną nagrzewnicę (rys. 6). W tym wypadku również problemem może być niewystarczająca powierzchnia styku wymiennika z regeneratorem.



Rys. 9. Wymienniki ciepła z pianką miedzianą: a) równoległy, b) meandrowy

Problem niedostatecznego kontaktu na styku powierzchni regeneratora i wymiennika ciepła został podjęty w ramach projektu nagrzewnicy i chłodnicy do chłodziarki termoakustycznej [3]. Zaproponowane zostało rozwiązanie wykorzystujące spienioną miedź jako materiał o wysokiej przewodności cieplnej i relatywnie dużej powierzchni styku z regeneratorem. Jednocześnie wysoka porowatość materiału (80%) miała zapewnić wystarczającą przepuszczalność fali akustycznej. W tym rozwiązaniu rurki miedziane, przed włożeniem przez wywiercone w piance otwory, poddaje się piaskowaniu i pokrywa się warstwą cyny w celu zapewnienia jak najlepszego kontaktu między rurek z pianką. Ciepło od rurek wymiennika, przez które przepływa ciecz, przekazuje ciepło do regeneratora na sposób przewodzenia.

Zaproponowane zostały dwa typy wymienników. Równoległy wymiennik ciepła (rys. 9a) zapewnia równomierny rozkład cieczy wewnątrz rurek oraz w porównaniu z szeregowym powoduje mniejsze opory hydrauliczne. Wymiennik szeregowo-

równoległy (meandrowy) (rys. 9b) jest kompromisem między zwiększeniem prędkości przepływu cieczy w stosunku do rozwiązania pierwszego (mniejsza ilość rurek połączonych równolegle), a co za tym idzie – intensyfikacji wymiany ciepła oraz możliwie jak najmniejszymi oporami przepływu.

#### 4. PODSUMOWANIE

Zagadnienie dostarczania i odbierania ciepła od regeneratora jest kluczowym dla całej dziedziny termoakustyki. Obecnie największy nacisk kładzie się na poprawienie efektywności wymiany ciepła w urządzeniu, ponieważ wpływa to bezpośrednio na poprawienie sprawności układu. Przy konstruowaniu wymienników ciepła do urządzeń termoakustycznych trzeba zwrócić uwagę na czynniki takie jak: niewielka powierzchnia wymiany ciepła, przepuszczalność fali akustycznej, czy brak przepływ gazu. Poprawienie sprawności energetycznej urządzeń termoakustycznych mogłoby spowodować większe nimi zainteresowanie oraz szybsze przystosowanie ich do zastosowań komercyjnych. W tej chwili urządzenia te osiągają sprawność rzędu 30% w odniesieniu do sprawności Carnota.

Kolejnym krokiem w rozwoju wymienników współpracujących z urządzeniami termoakustycznymi jest stworzenie wymiennika, w którym czynnik obiegowy przechodziłby przemianę fazową. Podczas tego procesu konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła  $\alpha$  osiąga wartości wyższe o rząd wielkości, a więc umożliwia przekazanie dużo większego strumienia ciepła.

#### LITERATURA

- [1] **Lord Rayleigh, Strutt J.W.:** *The theory of sound*, Vol. II, Dover publications, second, revised edition, 1945.
- [2] **de Blok C.M.:** *Novel 4-stage travelling wave thermoacoustic power generator*, Montreal, 2010, FEDSM2010-ICNMM2010.
- [3] **Ruziewicz A., Zimnowłodzki P.:** *Projekt chłodnicy i nagrzewnicy, współpracujących z regeneratorem urządzenia termoakustycznego Stirlinga*, Praca magisterska, promotor: Zbigniew Gnutek, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, 2012.
- [4] **Kays, London:** *Compact Heat Exchangers 3rd Edition.*, 10<sup>th</sup> New York : McGraw-Hill, 1984.
- [5] **Bastyr K.J., Keolian R.M.:** High-frequency thermoacoustic-Stirling heat engine demonstration device, Acoustic Research letters Online, Acoustical Society of America, 2003, DOI 10.1121/1.1558931.
- [6] **Jaworski, A.J., Yu Z. i Backhaus S.:** *Design of a Low-Cost Thermoacoustic Electricity Generator and Its Experimental Verification*, Istanbul, 2010, ESDA2010-24598.
- [7] **Tijani H., Spoelstra S. i Poignand G.:** *Study of a thermoacoustic-Stirling engine*, Acoustics Paris, 2008, 3539-3544.
- [8] **Abduljalil A.S.A.:** *Investigation of thermoacoustic processes in a travelling-wave looped-tube thermoacoustic engine*, praca doktorska, Faculty of Engineering and Physical Sciences The university of Manchester, 2012, 113-115.