

## Badania możliwości pomiaru strumienia objętości czynnika dwufazowego przepływomierzem ultradźwiękowym

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań dotyczące pomiaru przepływu dwufazowego ciecz-gaz przepływomierzem ultradźwiękowym w rurociągu pionowym o średnicy 50 mm. Stwierdzono, że w pomiarze przepływu dwufazowego odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru jest większe niż dla przepływu jednofazowego. Stwierdzono, że jest możliwy pomiar przepływu dwufazowego ciecz-gaz przy pomocy przepływomierza ultradźwiękowego po uwzględnieniu współczynnika poprawkowego.

**Abstract.** The article presents preliminary results of research on two phase gas-liquid flow measurement with ultrasonic flow meter. It was found that two-phase flow measurement standard deviation of a single measurement is greater than homogeneous flow. It has been found that it is possible to measure the flow of gas-liquid two-phase using an ultrasonic flowmeter having the correction factor. (Research into the potential flow rate measurement refrigerant two-phase ultrasonic flowmeter).

**Słowa kluczowe:** Pomiar, przepływ dwufazowy ciecz-gaz, przepływomierz ultradźwiękowy

**Keywords:** Measurement, two-phase liquid-gas flow, ultrasonic flowmeter

### Wstęp

Bezinwazyjne metody pomiaru strumieni przepływów coraz częściej wykorzystywane są w pomiarach bilansowych maszyn i urządzeń energetycznych [1,2,3]. Nie zaburzają one przepływu, nie powodują dodatkowych strat ciśnienia, a ich zastosowanie nie wiąże się z koniecznością zatrzymania pracy urządzenia w celu montażu przepływomierzy. Dokładność wskazań tych przepływomierzy jest porównywalna z dokładnościami innych urządzeń wykorzystywanych w pomiarach strumieni płynów np. przepływomierzami wirowymi, turbinkowymi czy zwężkowymi lub uśredniającymi. Średni błąd graniczny wskazań wynosi 2% wartości wskazanej strumienia przepływu. Do podstawowej grupy przepływomierzy bezinwazyjnych należą przepływomierze ultradźwiękowe. Ich zaletą jest to, że nadają się do pomiaru strumieni przepływów w rurociągach o dużych średnicach, niejednokrotnie większych niż 1 m, a więc w przypadku gdzie nie jest możliwe wykorzystanie większości znanych przepływomierzy. Dla przykładu przepływomierze ultradźwiękowe wykorzystuje się do ciągłego pomiaru strumieni wody chłodzącej skraplacze turbin parowych w elektrowniach zawodowych. Rurociągi przepływowe mają tam średnice znacznie przewyższające 1 m, a prawidłowy bilans wody chłodzącej niezbędny jest do optymalizacji pracy i sterowania chłodnią kominową. Pomiar strumieni przepływów metodami ultradźwiękowymi może napotkać również na pewne trudności, a mianowicie: przepływomierze te wrażliwe są na zaburzenia przepływu związane z niezachowaniem odpowiednich długości odcinków prostych w rurociągu przepływowym, wymaganych przy montażu tego rodzaju urządzenia. Również zmiana temperatury przepływającego czynnika powoduje konieczność korekty odległości między czujnikami ultradźwiękowymi – co w przypadku ich ciągłej pracy jest praktycznie niemożliwe. Główne problemy występujące w pomiarach metodami ultradźwiękowymi opisał w swoim artykule Cichoń [4]. Nie uwzględnił on jednak możliwości pomiarów tymi przepływomierzami przepływów dwufazowych ciecz - gaz. Przepływy takie występują dość często, a związane są np. ze zjawiskiem kawitacji, czy nieszczelnością układu pomiarowego. Faza gazowa cechuje się wysoką tłumiennością fali ultradźwiękowej, co związane jest ze ściśliwością gazów, przez co przepływomierz ultradźwiękowy może nie wskazywać w sposób poprawny strumienia przepływu lub całkowicie zatrzymać pomiar. Dodatkowym niekorzystnym

czynnikiem jest załamanie fali ultradźwiękowej na granicy faz, czego skutkiem jest rozproszenie wiązki w ośrodku przez który ona przechodzi. Wynika to z faktu, że ciecze i gazy, w odróżnieniu od ciał stałych, nie posiadają zdolności przenoszenia składowej poprzecznej fali ultradźwiękowej. Skutkiem tego jest zwielokrotnienie liczby wiązek fali przy przejściu przez granicę ośrodków oraz osłabienie i powielanie sygnału odbieranego przez głowicę ultradźwiękową. W rezultacie otrzymane wyniki pomiaru strumienia płynu, w którym znajduje się również faza gazowa, obarczone są błędem systematycznym. W związku z tym w celu prawidłowej interpretacji wskazań przepływomierza ultradźwiękowego należy wprowadzić współczynnik poprawkowy.

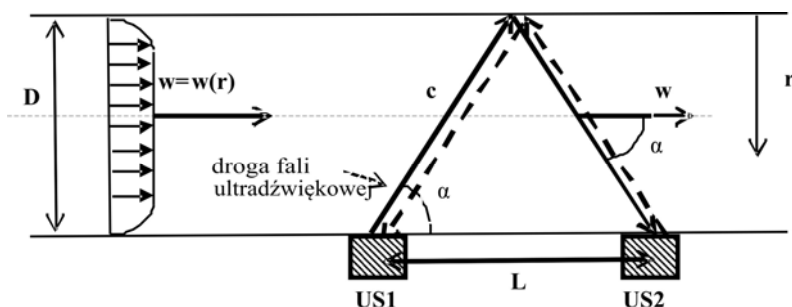
Celem pracy jest sprawdzenie możliwości pomiaru strumienia przepływu cieczy w przypadku pojawienia się w rurociągu pionowym fazy gazowej. Badania doświadczalne wykonano dwoma przepływomierzami ultradźwiękowymi: Prosonic Flow 92 i Portaflow 330.

### Zasada pomiaru

Oba wykorzystywane w pomiarach przepływomierze pracują w oparciu o zasadę Transit-Time, która polega na pomiarze różnicy czasów przejścia fali ultradźwiękowej między dwoma czujnikami. Fala ultradźwiękowa przechodzi z prądem i pod prąd przepływającego płynu, a różnica czasów przejścia proporcjonalna jest do prędkości płynu [5]. Wprowadzając do jednostki centralnej przepływomierzy obwód rurociągu i grubość ścianki na ekranie wyświetlacza pokazana zostanie chwilowa wartość strumienia przepływu. Oczywiście sygnały mogą być rejestrowane z minimalnym okresem próbkowania, który jest określony dla każdego z rodzajów przepływomierzy. Zasadę pomiarową w przypadku podwójnego przejścia fali ultradźwiękowej między czujnikami (metoda „V”) przedstawia rysunek 1. (bez uwzględnienia grubości ścianek rurociągu). Taka metoda jest bardzo często wykorzystywana w pomiarach, gdyż pozwala na dokładny pomiar czasów przejścia fali ultradźwiękowej między czujnikami. Dla rurociągów o średnicach  $D$  dużo większych niż 1 m zalecana jest metoda typu „Z” ze względu na tłumienie fali ultradźwiękowej.

Różnicę czasów przejścia fali ultradźwiękowej  $\Delta t = t_2 - t_1$  między czujnikami US2 i US1 przedstawia równanie:

$$(1) \quad \Delta t = \frac{L}{\cos \alpha} \left[ \frac{1}{(c - w \cos \alpha)} - \frac{1}{(c + w \cos \alpha)} \right]$$



Rys.1. Realizacja pomiaru strumieni przepływów metodą typ „V”

Przyjmując dalej, że prędkość fali ultradźwiękowej  $c$  jest dużo większa niż prędkość wody w tzn.  $c \gg w$  równanie to można napisać w postaci:

$$(2) \quad \Delta t = \frac{2 \cdot L \cdot w}{c^2}$$

Objęściowy strumień przepływu wyraża się równaniem:

$$(3) \quad q_v = \bar{w} \cdot \frac{\pi D^2}{4}$$

w którym  $\bar{w}$  jest prędkością średnią wody w rurociągu.

Ponieważ prędkość w przekroju rurociągu, w ogólnym przypadku, zależy od promienia  $r$  czyli  $w = w(r)$ , można dalej zapisać, że prędkość średnia  $\bar{w} = K \cdot w$ . Równanie (4) przedstawia się zatem następująco:

$$(4) \quad q_v = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{D^2}{L} \cdot K \cdot c^2 \cdot \Delta t$$

w którym współczynnik  $K$  nazywa się współczynnikiem czułości i jest wyznaczony przez wzorcowanie przepływomierza. Z równania (4) wynika, że jeżeli w rurociągu przepływa wraz z fazą ciekłą również faza

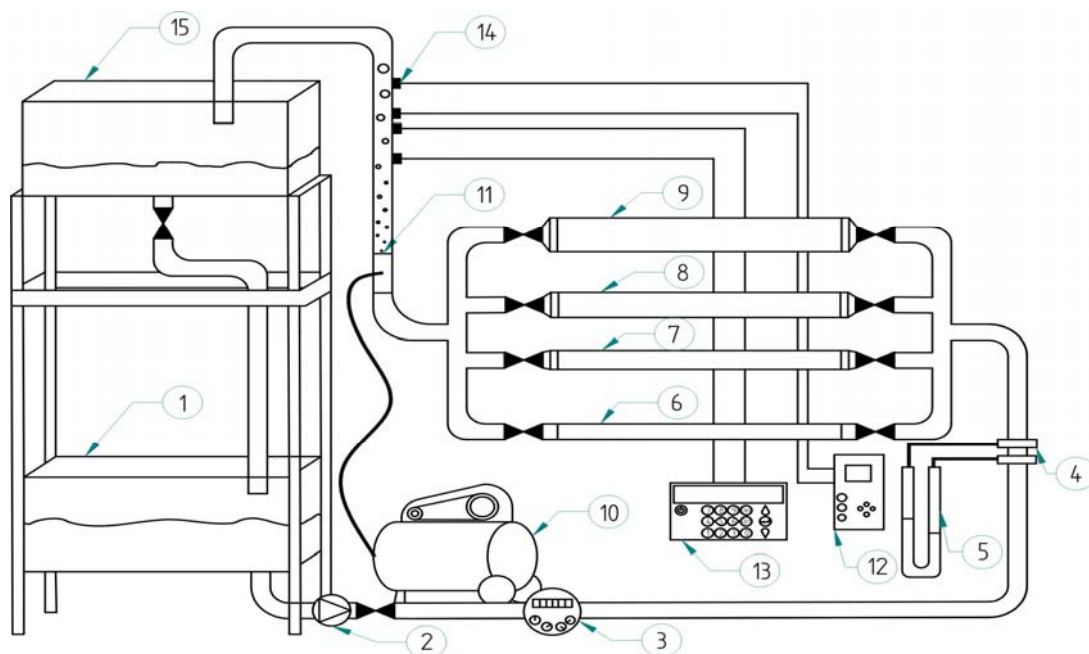
gazowa, to może zmienić się czas przejścia fali między czujnikami ( $\Delta t$ ), gdyż prędkość fali ultradźwiękowej w powietrzu wynosi ok. 340 m/s, a w wodzie jest rzędu 1500 m/s. Ponadto powietrze bardzo silnie tłumi fale ultradźwiękowe, kilkaset razy silniej niż woda i sygnał wysłany z jednego czujnika może nie dotrzeć do drugiego. W takich sytuacjach wyniki pomiaru strumienia przepływu mogą być obciążone znacznymi błędami.

### Sposób realizacji pomiarów

Pomiary strumieni przepływów obydwoma przepływomierzami wykonano na stanowisku pokazanym na rysunku 2. Przepływy mierzono metodą typu „V”, a oba przepływomierze umieszczono na rurze pionowej o średnicy wewnętrznej 50 mm z zachowaniem odpowiednich długości odcinków prostych przed i za przepływomierzami. W dolnej części rury wprowadzano powietrze w ilości  $q_{vp} = 0,05 \text{ dm}^3/\text{s}$ , a strumień przepływającej w instalacji wody zmieniano w zakresie od  $0,4 \text{ dm}^3/\text{s}$  do  $3,3 \text{ dm}^3/\text{s}$ , i mierzono go wodomierzem w czasie 5 minut dla każdego strumienia objętości. Sygnały z obu przepływomierzy ultradźwiękowych rejestrowano przez 10 minut z okresem próbkowania 3 s. Stanowisko badawcze składa się ze zbiornika wody (1), pompy o regulowanej wydajności (2), wodomierza (3), rurociągów o różnych średnicach (6) – (9) przeznaczonych do dalszych badań na rurociągach poziomych, pionowego odcinka pomiarowego DN50, dystrybutora fazy gazowej (11), zbiornika odgazowującego (15). Na odcinku pomiarowym zainstalowano sondy ultradźwiękowe (14) podłączone do przepływomierzy ultradźwiękowych (12) i (13).

### Wyniki pomiarów

Rysunki 3 i 4 przedstawiają typowe sygnały pomiarowe zarejestrowane przez dwa przepływomierze dla dwóch różnych strumieni objętości wody przepływającej przez obszar pomiarowy. Zaznaczono na nich czas w którym wprowadzono do przepływu drugą fazę – powietrze.



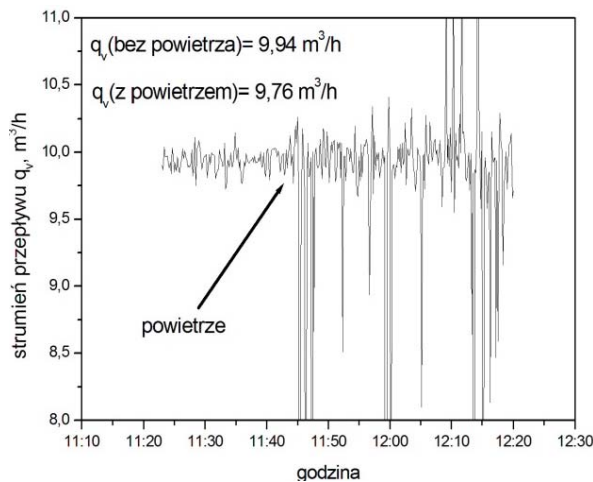
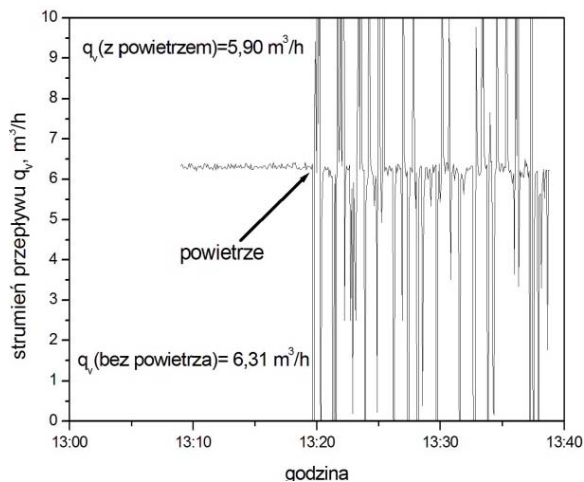
Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 - zbiornik wody, 2 - pompa, 3 - wodomierz, 4 - kryza miernicza, 5 - manometr różnicowy, 6 - rurociąg 50, 7 - rurociąg 60, 8 - rurociąg 80, 9 - rurociąg 110, 10 - kompresor, 11 - mieszalnik faz, 12 - przepływomierz ultradźwiękowy Prosonic 92 Flow, 13 - przepływomierz ultradźwiękowy Portaflow 330, 14 - sondy ultradźwiękowe, 15 - zbiornik odgazowujący

Na rysunku 3, dla przepływomierza Portaflow 330 pojawiają się w sygnałach pomiarowych charakterystyczne piki zmieniające swoje wartości z dodatnich na ujemne. Związane jest to prawdopodobnie z tym, że fala ultradźwiękowa po napotkaniu na swojej drodze powietrza uległa s tłumieniu i sygnał wysłany z jednego czujnika nie dochodził do drugiego. Natomiast sygnał wysyłany z drugiego czujnika nie napotkał na swojej drodze powietrza i czas przejścia fali rejestrowany był poprawnie. Dlatego, jeżeli np. w równaniu (4) do  $\Delta t$  zostanie podstawione  $t_1$ , które wynosi 0, to rejestrowany strumień przepływu ma

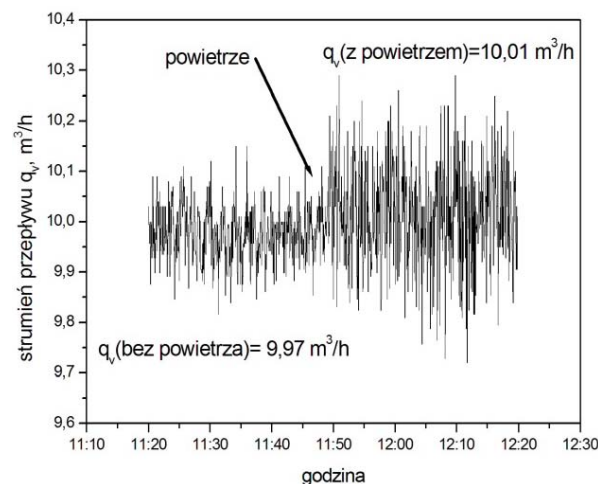
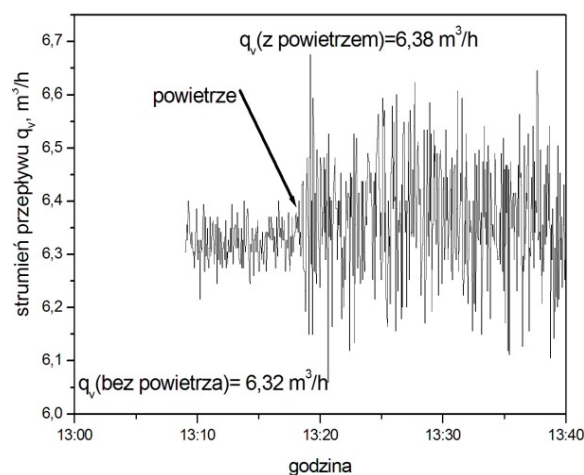
bardzo dużą ujemną wartość. Oczywiście sytuacja może być odwrotna i wtedy wartość strumienia objętości będzie miała dużą dodatnią wartość. Pojawianie się takich pików strumieni przepływu może powodować błąd uśredniania wartości strumieni przepływów.

W przypadku przepływomierza Prosonic Flow 92 po wprowadzeniu pęcherzy powietrza zwiększa się rozrzut wyników pomiarowych, a uśredniony strumień przepływu charakteryzować się będzie większym odchyleniem standardowym strumienia przepływu lub prędkości.

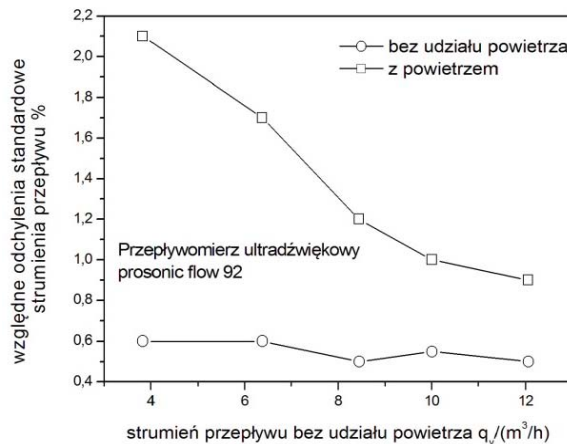
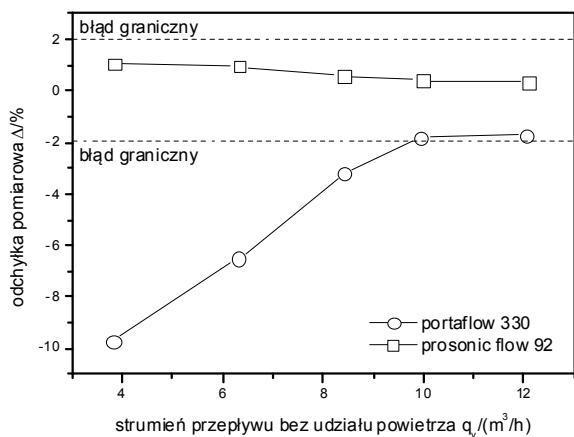
Rysunek 5a przedstawia zależność odchyłek



Rys. 3. Przykładowe sygnały pomiarowe dla przepływu woda – powietrze dla przepływomierza Portaflow 330



Rys. 4. Przykładowe sygnały pomiarowe dla przepływu woda – powietrze dla przepływomierza Prosonic Flow 92



Rys. 5. Odchyłki pomiarowe (a) i odchylenia standardowe (b) strumienia przepływu w przypadku pomiarów bez i z udziałem pęcherzy powietrza

pomiarowych, mierzonych strumieni przepływów dwufazowych, dla obu wykorzystywanych w pomiarach przepływomierzy ultradźwiękowych. Odchyłki wyrażone w procentach liczono jako różnicę wskazania średnich wartości strumieni przepływu z udziałem fazy gazowej i bez jej udziału, odniesione do średnich wartości strumieni przepływu bez udziału drugiej fazy. Rysunek 5b przedstawia zmiany względnych odchyłek standardowych strumieni przepływu w przypadku pomiaru przepływomierzem Prosonic Flow 92. Odchylenia te liczono dla 10 minutowego czasu pomiaru strumieni przepływu. Można zauważyć, że wprowadzenie drugiej fazy do rurociągu przepływowego powoduje zwiększenie odchyłek standardowych mierzonego strumienia przepływu.

#### Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary pokazały, że możliwy jest pomiar strumieni przepływów dwufazowych woda-powietrze przepływomierzami ultradźwiękowymi. Przepływomierz Prosonic Flow 92 na pojawienie się drugiej fazy reaguje większym rozrzutem wyników pomiarowych, natomiast obliczona wartość średnia strumienia przepływu niewiele się zmienia w stosunku do wartości średniej bez udziału powietrza – odchyłki wskazań tego przepływomierza mieszczą się w zakresie błędu granicznego. W przypadku przepływomierza Portaflow 330 w wyniku pomiaru należy uwzględnić poprawkę, gdyż udział drugiej fazy powoduje zaniżanie wartości średnich pomiarów strumieni przepływu. Dopiero dla strumieni objętości większych niż  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  odchyłki wskazań zawierają się w przedziale błędu granicznego. Można zauważyć również, że wartości odchyłek standardowych strumieni przepływu w przepływie woda-powietrze maleją wraz ze wzrostem strumienia przepływu wody w instalacji i dla strumienia przepływu  $12 \text{ m}^3/\text{h}$  osiąga wartość 0,9%. Jest to związane z tym, że przy wzroście tego strumienia i stałym strumieniu objętości powietrza włączanego do instalacji zmniejsza się wielkość pęcherzy powietrza i są one mniejszą przeszkodą dla fali

ultradźwiękowej niż w przypadku gdy w instalacji przepływa mały strumień objętości wody. Należy zaznaczyć, że przeprowadzone badania były wstępnymi pracami dotyczącymi możliwości pomiarów strumieni dwufazowych przepływomierzami ultradźwiękowymi, a w dalszych etapach pracy przewiduje się m.in. wykonanie pomiarów przy różnych udziałach fazy gazowej dla różnego sposobu montażu czujników ultradźwiękowych na rurociągu.

#### LITERATURA

- [1] Andruszkiewicz A., Kubas K., Pliszka P., Wędrychowicz W., Pomiary strumieni masy w rurociągach wody chłodzącej skraplacze w elektrowni zawodowej, *Pomiary Automatyka Robotyka*, (2006), nr 9
- [2] Górecki J., Andruszkiewicz A., Kubas K., Pomiary strumieni przepływów w rurociągach o dużych średnicach, *Energetyka*, (2006), nr 6
- [3] Andruszkiewicz A., Bezwładnościowy przepływomierz kolanowy, *Elektronika*, (2005), nr 2
- [4] Cichoń M., Bezinwazyjne pomiary przepływu, czyli rozprawa z mitami – cz. I, *Pod Kontrolą*, (2014), nr 4
- [5] Waluś S., Przepływomierze ultradźwiękowe: metodyka stosowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (1997)

---

**Autorzy:** mgr inż. Piotr Synowiec, Politechnika Wroclawska, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [piotr.synowiec@pwr.edu.pl](mailto:piotr.synowiec@pwr.edu.pl); dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz prof. PWr., Politechnika Wroclawska, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [artur.andruszkiewicz@pwr.edu.pl](mailto:artur.andruszkiewicz@pwr.edu.pl); dr inż. Wiesław Wędrychowicz, Politechnika Wroclawska, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [wieslaw.wedrychowicz@pwr.edu.pl](mailto:wieslaw.wedrychowicz@pwr.edu.pl); dr Paweł Regucki, Politechnika Wroclawska, Katedra Technologii Energetycznych, Turbin i Modelowania Procesów Ciepłno-Przepływowych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [pawel.regucki@pwr.edu.pl](mailto:pawel.regucki@pwr.edu.pl).