

Pomiary strumieni masy w rurociągach wody chłodzącej skraplacze w elektrowni zawodowej

Artur Andruszkiewicz, Krzysztof Kubas, Paweł Pliszka, Wiesław Wędrychowicz

Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

Streszczenie: W artykule przedstawiono trzy podstawowe sposoby ciągłego pomiaru strumieni wody w rurociągach o bardzo dużych średnicach i krótkich odcinkach prostych między elementami armatury występujących m.in. w rurociągach wody chłodzącej skraplacze turbin parowych. Opisano zasadę działania i przedstawiono przykładowe charakterystyki przepływomierzy kolanowych i uśredniających. Wskazano główne problemy, jakie spotyka się podczas eksploatacji tych przepływomierzy. Wskazano, że ciągłe pomiary strumieni masy w rurociągach o dużych średnicach i krótkich odcinkach są niezbędne, np. w bilansowaniu układów chłodni kominowej i skraplaczy turbin parowych. Wykazano, że niepewności pomiaru strumieni masy takimi urządzeniami są rzędu 3–4 %.

Słowa kluczowe: strumień masy, metoda bezinwazyjna, metody piętrzące

DOI: 10.14313/PAR_211/91

W elektrowniach zawodowych kontrola pracy kondensatorów, a także bilanse chłodni kominowych wymagają ciągłego pomiaru strumieni masy wody w rurociągach

chłodzących skraplacze. Przy braku pomiaru stopnia suchości pary opuszającej turbinę, z bilansu skraplacza, przy dokładnym pomiarze strumienia masy wody, można wyznaczyć również końcowy punkt rozprężania pary. Pomiary strumieni masy w takich rurociągach nie są proste w realizacji, gdyż rurociągi te mają średnice znacznie przewyższające 1 m, a więc zastosowanie klasycznych metod pomiaru, do których należy np. metoda zwężkowa, jest niemożliwe ze względu na przekroczenie zakresu stosowalności. Również wykorzystanie w pomiarach rurek piętrzących jest utrudnione z powodu trudności związanych z koniecznością ich przesuwania wzdłuż średnicy rurociągu. W artykule zaprezentowano trzy sposoby ciągłego pomiaru strumieni masy wody w rurociągach chłodni kominowych zrealizowanych w jednej z polskich elektrowni, a mianowicie: metodę ultradźwiękową, metodę wykorzystującą kolana i metodę wykorzystującą rurki uśredniające. Omówiono zasadę pomiaru i przedstawiono występujące problemy pomiarowe.

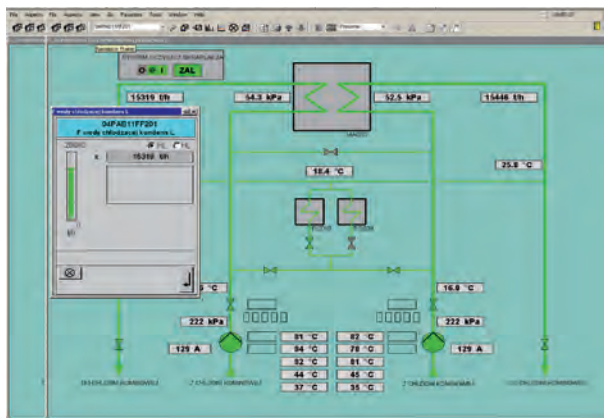
1. Przepływomierze ultradźwiękowe

Na rys. 1 przedstawiono, po lewej stronie, zdjęcie głowic ultradźwiękowych przepływomierza typu „transit time” zainstalowane na rurociągu wody chłodzącej, a po prawej stronie jednostkę centralną przepływomierza, z której sygnał pomia-



Rys. 1. Przepływomierz ultradźwiękowy: po lewej – głowice przepływomierza, po prawej – jednostka centralna

Fig. 1. Ultrasonic flow meter: on the left – flow meter heads, on the right – the central unit



Rys. 2. Widok monitora operatora w nastawni układu skraplaczy wraz z wartością strumienia wody przepływającą przez skraplacze

Fig. 2. View of the operator's monitor in the control room of the condensers' layout with the value of the water stream flowing through the condensers

rowy proporcjonalny do strumienia masy jest przekazywany do nastawni. Na rys. 2 przedstawiono widok monitora operatora w nastawni układu skraplaczy wraz z informacją o strumieniu masy wody przepływającej przez skraplacze.

Pomiar strumienia masy wody w układach chłodni kominowej za pomocą przepływomierzy ultradźwiękowych charakteryzuje się największą dokładnością z zaleczanych do pomiaru, wynoszącą 1 %, to jednak w uzyskaniu tak małej wartości występuje szereg trudności. Na dokładność pomiaru ultradźwiękami wpływa długość odcinków prostych przed głowicami ultradźwiękowymi. Przyjmuje się, że długość odcinka prostego przed przepływomierzem powinna wynosić około 20 średnic rurociągu, ale znalezienie tak długiego rurociągu wodnego (np. dla średnicy rury ok. 2 m długość odcinka napływowego powinna wynosić ok. 40 m) może być trudne. Głowice przepływie-

rza montuje się wtedy w niewielkiej odległości od miejsca zaburzenia przepływu np. kolana. W takim przypadku występuje systematyczny błąd pomiaru i do wyniku należałoby wprowadzić poprawkę, która jest funkcją liczby Reynoldsa. Dla przykładu, na wykresie (rys. 3) pokazano wartości współczynników poprawkowych K dla przepływomierza Prosonic Flow 92 zamontowanego zaraz za kolaniem w przewodzie przepływowym o średnicy wewnętrznej równej 50 mm. Pomiary wykonano w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, na instalacji pokazanej na zdjęciu (rys. 3). Z zamieszczonego wykresu można odczytać, że montaż głowic ultradźwiękowych za kolaniem wprowadza w tym układzie dodatkowy ok. 6 % błąd pomiaru w stosunku do wskazań przepływomierza wirowego, który był przepływomierzem wzorcowym.

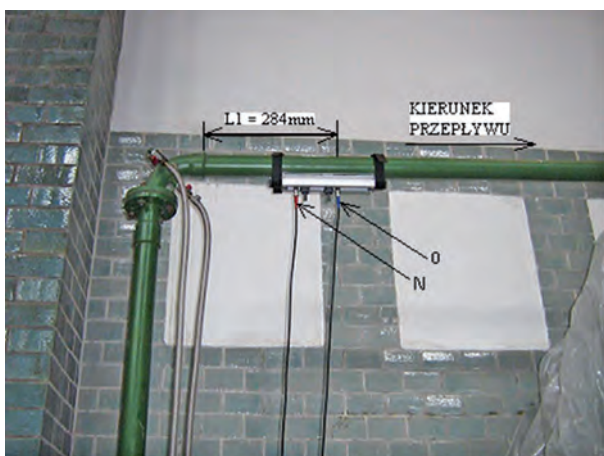
Podczas pomiarów wykonywanych przepływomierzem ultradźwiękowym należy zwrócić uwagę na to, że głowice ultradźwiękowe powinny mocno przylegać do rurociągu, a więc wymagana jest co pewien czas kontrola stanu napięcia stalowych taśm mocujących. Również między czujnikiem a ścianką rurociągu powinna być stale warstwa sprężająca (np. wazelina), której zadaniem jest wyparcie powietrza – wymaga to również co pewien czas kontroli i uzupełnienia w razie konieczności tej warstwy.

2. Przepływomierze kolanowe

Do ciągłego pomiaru strumienia masy w rurociągach o dużych średnicach można wykorzystać również istniejące w instalacji kolana. Na rys. 4 pokazano przepływomierz kolanowy wraz z przetwornikiem firmy Aplisens typu APR-2000/AL do pomiaru różnicy ciśnień między zewnętrzną i wewnętrzną stroną kolana.

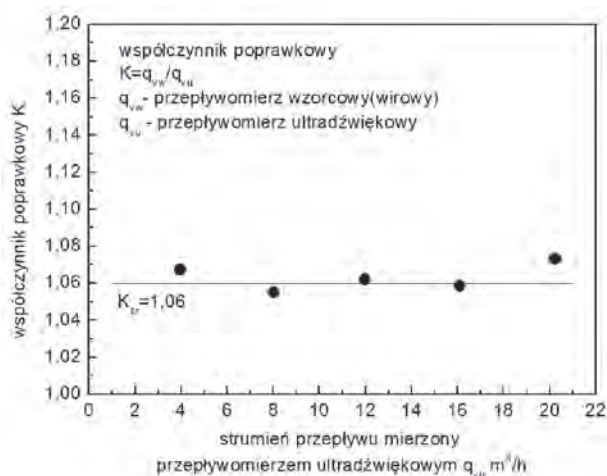
Równanie charakterystyki przepływomierza przedstawiają następujące równania (1):

$$q_m = C \cdot \sqrt{\Delta p} \quad \text{lub} \quad q_m = C^* \cdot \sqrt{I - 4} \quad (1)$$



Rys. 3. Krzywa współczynników poprawkowych dla przepływomierza Prosonic Flow 92 wraz ze zdjęciem przedstawiającym miejsce montażu głowic ultradźwiękowych: N – głowica nadawcza, O – głowica odbiorcza

Fig. 3. Curve correction coefficient for the flow meter Prosonic Flow 92 with a picture of the place of ultrasonic heads installation: N – sending head, O – receiving head





Rys. 4. Układ przepływomierza kolanowego

Fig. 4. Elbow flow meters layout

w których: C i C^* – współczynniki przepływu, Δp – różnica ciśnień po zewnętrznej i wewnętrznej stronie kolana, I – natężenie prądu z przetwornika.

Z równań wynika, że konieczna jest znajomość wartości współczynników C i C^* . Dla danego typu kolana mogą być one wyznaczone w trakcie wzorcowania, przez pomiar strumienia objętości lub masy inną metodą, np. przenośnym przepływomierzem ultradźwiękowym wysokiej klasy, przy zachowaniu odpowiednich odcinków prostych. Na rys. 5 przedstawiono przykładową charakterystykę dla tego przepływomierza kolanowego wraz z zależnością współczynnika przepływu w funkcji liczby Reynoldsa.

Niepewność pomiaru (typu A – z 20 wyników pomiaru) strumieni przepływu takim przepływomierzem w warunkach przemysłowych jest rzędu 3–4 %. Wynika ona głównie z dużego rozrzutu wartości różnicy ciśnień na kolanie, a więc z błędów przypadkowych. Eksploatacja przepływomierza kolanowego wymaga również okresowego sprawdzenia stałości charakterystyki współczynnika przepływu C lub C^* w funkcji liczby Reynoldsa (zmiany charakterystyki spowodowane mogą być erozją wewnętrznych ścianek kolana związanych z przepływającym płynem).

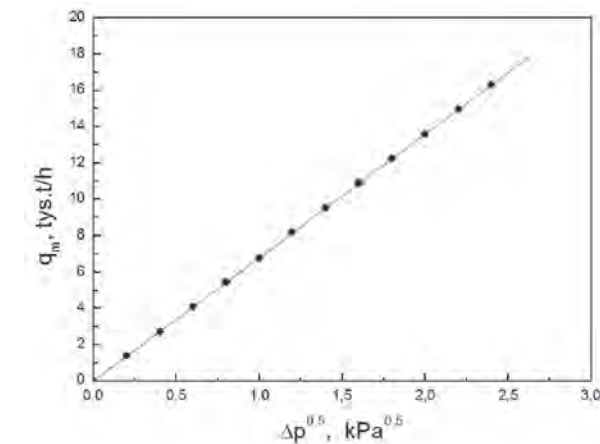
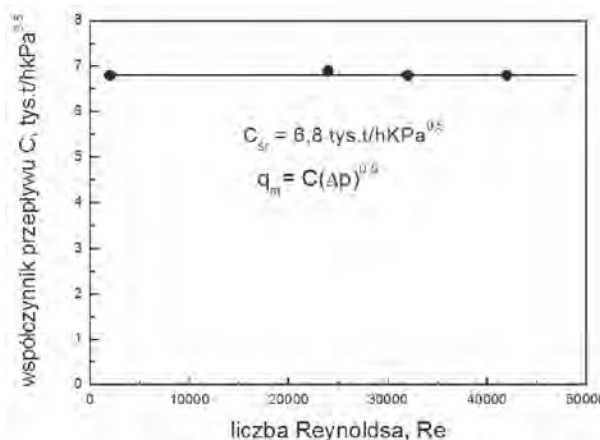
3. Przepływomierze uśredniające ciśnienie dynamiczne

Na rys. 6 przedstawiono schemat ideowy przepływomierza uśredniającego wraz ze zdjęciem sond, które zostały zamontowane w rurociągu wody chłodzącej.

W rurociągu wodnym (1) montowane są w sposób pokazany na rysunku rurki (2) uśredniające ciśnienie całkowite. Połączenie ścianki rury z rurkami uśredniającymi realizowane jest przez dławikowe elementy mocujące (3). Z jednego końca rurek uśredniających, za pomocą zaworu (7) i przewodów impulsowych (9) ciśnienie podawane jest do przetwornika $\Delta p/I$ (14). Na drugim końcu rurek umieszczone są zawory (8) do usuwania zanieczyszczeń (np. sprężonym powietrzem) z układu pomiaru ciśnienia całkowitego. Ciśnienie statyczne poprzez króciec (4), zawór kulowy (5) i przewód impulsowy (10) dociera do przetwornika $\Delta p/I$ (14). Przy króćcu (4) znajduje się zawór (6) służący do udrażniania króćca ciśnienia statycz-

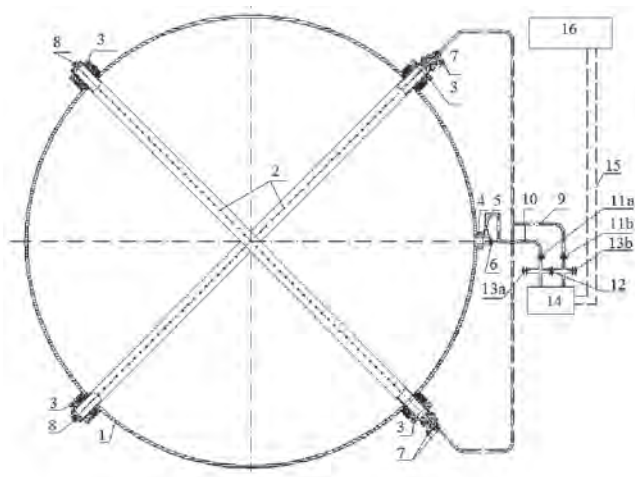


nego. W układzie pomiarowym zastosowano przetwornik $\Delta p/I$ Fischer-Rosemount (14), który pętlą prądową (15) połączony jest z cyfrowym wskaźnikiem i rejestratorem przepływu (16) w nastawni bloku. Między układem pomiarowym a przetwornikiem zastosowano układ zawo-



Rys. 5. Przykładowe charakterystyki przepływomierza kolanowego

Fig. 5. Sample characteristics of the knee flow meter



Rys. 6. Schemat przepływomierza uśredniającego
Fig. 6. Diagram of the averaging flow meter

rów odcinających (11), odpowietrzających (13) i zerującego (12).

Zasada pomiaru polega na rejestracji średniego ciśnienia dynamicznego, czyli różnicy ciśnień całkowitych, uśrednianych przez sondy pomiarowe i ciśnienia statycznego odbieranego ze ścianki rurociągu. Średnie ciśnienie dynamiczne jest funkcją prędkości średniej wody przepływającej przez rurociąg. Znając przekrój rurociągu i gęstość przepływającej cieczy, można obliczyć strumień masy przepływu. Równania charakterystyki tego przepływomierza można przedstawić w postaci równania (2):

$$q_m = K \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_d \cdot \rho} = C \cdot \sqrt{\Delta p_d} \quad (2)$$

w którym: K – współczynnik przepływu, C – stała przepływomierza, A – pole przekroju rurociągu, ρ – gęstość płynu, Δp_d – ciśnienie dynamiczne.

Równanie (2) ma postać analogiczną, jak równanie charakterystyki przepływomierza kolanowego z tym, że zamiast różnicy ciśnień statycznych występuje ciśnienie dynamiczne Δp_d .

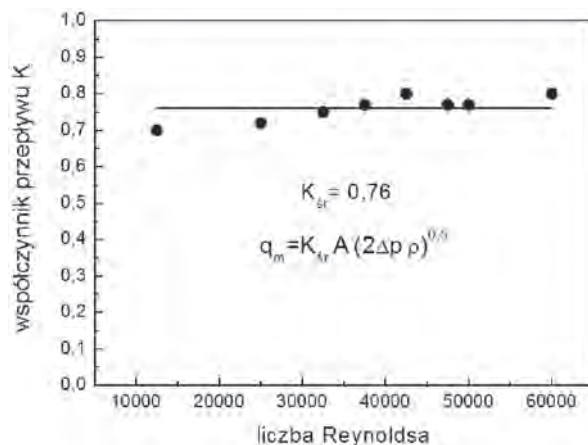
Na rys. 7 przedstawiono sposób zamontowania sond uśredniających w rurociągu wraz z odbiorem ciśnienia całkowitych i statycz-



nych, jak również uzyskaną dla tego układu charakterystykę współczynnika K w funkcji liczby Reynoldsa.

Niepewność pomiaru strumienia masy takim przepływomierzem są zbliżone do niepewności pomiaru przepływomierzem kolanowym i wynosi ok. 3–4 %. Zależy ona między innymi od długości odcinków prostych przed sondami, a także od miejsca odbioru ciśnienia statycznego. Czasami zdarza się (jak to pokazano na rys. 7), że w wyniku braku miejsca odbiór ciśnienia statycznego znajduje się za sondami uśredniającymi.

Powoduje to zwiększenie niepewności pomiaru strumienia i przepływomierz wymaga specjalnego wzorcowania za pomocą innej metody pomiarowej. Należy pamiętać, że warunkiem poprawnego pomiaru jest wypełnienie wodą całego przekroju rurociągu. Na rys. 7 pokazano również, że na odbiorze ciśnienia statycznego zamontowano specjalnie wykonany zbiorniczek wyrównawczy, którego celem jest tłumienie pulsacji ciśnienia, a tym samym zmniejszenie niepewności pomiaru typu A. W trakcie eksploatacji przedstawionego układu pomiarowego przeprowadzone zostały co parę miesięcy kontrole stanu rurek uśredniających ciśnienie całkowite. W wyniku kontroli nie stwierdzono zatykania się otworów pomiarowych w rurkach uśredniających.



Rys. 7. Sposób zamontowania sond uśredniających w rurociągu wraz z charakterystyką współczynnika K w funkcji liczby Reynoldsa

Fig. 7. A method to install the probes averaging in the pipeline with the characteristic of the K coefficient as a function of the Reynolds number

4. Podsumowanie

Przedstawione metody ciągłego pomiaru strumienia masy wody w rurociągach mają swoje wady i zalety. Metoda ultradźwiękowa wymaga ciągłej obsługi i kontroli w czasie eksploatacji, ale jest najprostsza w montażu. Przepływomierz kolanowy i sondy uśredniające wymagają ingerencji w rurociąg, ale późniejsza eksploatacja jest pewniejsza i nie wymaga stałego nadzoru. Ze względu na stosowanie przedstawionych przepływomierzy w nietypowych miejscach wszystkie wymagają przeprowadzenia pomiarów kontrolnych. Błędy pomiaru strumieni przepływu opisanymi urządzeniami są rzędu 3–4 %.

Bibliografia

1. Piotrowski J., *Pomiary – czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego*, WNT, Warszawa 2009.
2. Tajchman K., *Badanie przepływomierza ultradźwiękowego z nakładkami izolującymi od wysokiej temperatury czynnika i w niestandardowych warunkach pracy*, Praca dyplomowa stopnia magisterskiego, Wrocław 2014.
3. Waluś S., *Przepływomierze ultradźwiękowe. Metodyka stosowania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
4. Śliwiński A., *Ultradźwięki i ich zastosowania*, WNT, Warszawa 2001. ■

Measurements of streams flow in pipes of the cooling water condensers in professional power plant

Abstract: In this article are presented three basic methods of continual measurement steams of water in the pipelines with very big diameters and short straight sections between armature occurring, inter alia, in cooling water for steam turbines pipelines. There article describes the operating principle and shows samples characteristics of elbows and averaging flow meters. It shows main problems which appear during the exploitation of this flow metres, also showing that the continuous flow measurement of the water streams in pipelines with large diameters and short sections are necessary, for example in balancing the cooling tower layouts and steam turbines condensers. It is presented that the uncertainties of the flow streams measurement with this devices are of the order of 3–4 %.

Keywords: stream flow, non-invasive method, method of pilling

Artykuł recenzowany, nadesłany 24.03.2014 r., przyjęty do druku 24.06.2014 r.

dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz

Pracownik naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Miernictwa i Ochrony Atmosfery, w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej. Studia na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym ukończył w 1986 r., w 1996 r. uzyskał tytuł doktora, a w 2010 r. Rada Wydziału Mechaniczno-Energetycznego nadała mu stopień doktora habilitowanego w dziedzinie mechanika i budowa maszyn. Od 2013 r. jest profesorem nadzwyczajnym w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów. Jego zainteresowania skupiają się na metrologii, miernictwie energetycznym i badaniu maszyn i urządzeń energetycznych.

e-mail: Artur.Andruszkiewicz@pwr.edu.pl



dr inż. Krzysztof Kubas

Pracownik dydaktyczny w Zakładzie Miernictwa i Ochrony Atmosfery w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej. Studia na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym ukończył w 1986 r. i pracował na stanowisku technicznym w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów. W 2005 r. uzyskał tytuł doktora. Interesuje się pomiarami maszyn i urządzeń energetycznych oraz miernictwem termooenergetycznym.

e-mail: krzysztof.kubas@pwr.edu.pl



dr inż. Wiesław Wędrychowicz

Pracownik naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Miernictwa i Ochrony Atmosfery w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej. Studia na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym ukończył w 1995 r., a w 2001 r. uzyskał tytuł doktora. Interesuje się mechaniką płynów, pomiarami maszyn i urządzeń energetycznych oraz miernictwem termooenergetycznym.

e-mail: wieslaw.wedrychowicz@pwr.edu.pl



mgr inż. Paweł Pliszka

Doktorant w Zakładzie Miernictwa i Ochrony Atmosfery w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej. Studia na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym ukończył w 2009 r. Pracował na stanowisku technicznym przy projekcie badawczym w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów. Interesuje się pomiarami przepływów oraz nowatorskimi metodami rejestracji sygnałów.

e-mail: pawel.pliszka@pwr.edu.pl

