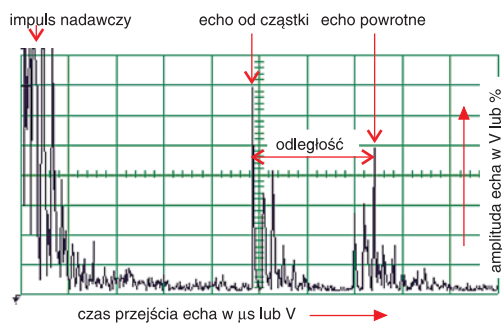


Adaptacja metod defektoskopowych do identyfikacji przepływów dwufazowych ciec-z-gaz

Artur Andruszkiewicz
Hans-Dieter Sommerlatt
Erwin Kaiser *

Fale ultradźwiękowe mają ogromne zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, techniki, a także w procesach przemysłowych. Powszechne jest dzisiaj wykorzystanie ultradźwięków w inżynierii materiałowej, elektronice, telekomunikacji czy medycynie. Jednym z najważniejszych jest wykorzystanie ultradźwięków do nieniszczącego badania materiałów – defektoskopii ultradźwiękowej [1, 2]. Praktycznie w każdym zakładzie przemysłu maszynowego pracują defektoskopy służące do kontroli materiałów. Wśród podstawowych metod pomiaru w defektoskopii ultradźwiękowej największe znaczenie ma impulsowa metoda echa. Podstawową jej zaletą jest to, iż do badań używa się jednej głowicy pomiarowej, umożliwia ona również wyznaczenie głębokości, na której znajduje się wada, a także ocenę jej wymiaru i orientacyjnego kształtu. Przykładowy obraz wady przy wykorzystaniu defektoskopu ultradźwiękowego USIP 20GP jest przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowy obraz wady – prezentacja typu A

W TU Dresden-Institut für Energiemaschinen und Maschinenlabor od wielu lat są prowadzone prace badawcze nad możliwościami wykorzystania impulsowej

metody echa w badaniach przepływów dwufazowych. Przepływy takie występują np. w reaktorach heterogenicznych (kolumny półkowe, pęcherzykowe, reaktory rurowe), w układach chłodzenia parowo-wodnych reaktorów jądrowych, w piecach rurowych, parownikach urządzeń chłodniczych czy urządzeniach wyparnych [3, 4]. Znajomość wielkości charakterystycznych (prędkości, koncentracji, rozkładu cząstek fazy gazowej) umożliwia identyfikację procesów wymiany ciepła, masy, a także ich optymalizację.

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości wykorzystania defektoskopii ultradźwiękowej wraz z oprogramowaniem DASYLab firmy DATALOG do wyznaczenia podstawowych parametrów przepływów dwufazowych ciec-z-gaz.

Zasada pomiaru przy wykorzystaniu impulsowej metody echa

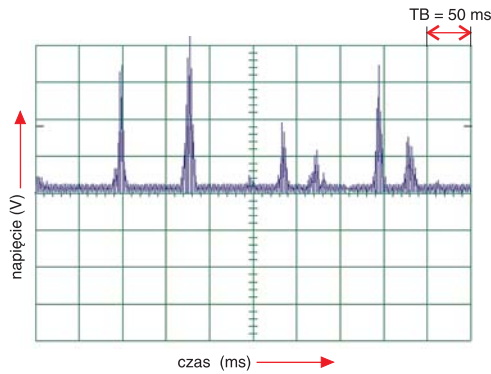
Zasadę pomiaru można przedstawić na podstawie rys. 1. Krótkie impulsy nadawcze z czujnika ultradźwiękowego po przejściu przez ściankę zbiornika ulegają odbiciu od cząstek fazy gazowej (lub wady materiału) i tylnej ścianki zbiornika, a następnie do niego z powrotem powracają. Defektoskop ultradźwiękowy rejestruje tylko te sygnały, których amplituda przekracza wartość nastawioną, wynoszącą przeciętnie 20 % wartości maksymalnej skali ekranu monitora. Przy tej wartości układ obliczający podaje czas przebiegu fali od nadajnika do reflektora i z powrotem, albo przy bezpośrednim wprowadzeniu do układu wartości prędkości fali w badanym ośrodku – odległość od reflektora. Równocześnie na ekranie monitora zostaje pokazana w procentach maksymalna amplituda echa – wartość ta umożliwia w defektoskopii ultradźwiękowej określenie rozmiaru wady materiału. Częstotliwość powtarzania impulsów ultradźwiękowych należy dobrać tak, aby echo odbite od tylnej ścianki wróciło szybciej niż zostanie wysłany następny impuls.

Maksymalna częstotliwość powtarzania impulsów dla defektoskopu ultradźwiękowego USIP20 GP wynosi 20 kHz przy pracy jednokanałowej, a przy pracy wielokanałowej 20 kHz/n, gdzie n – liczba kanałów.

* dr inż. Artur Andruszkiewicz – Politechnika Wroclawska, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów
dr inż. Hans-Dieter Sommerlatt, prof. dr hab. inż. Erwin Kaiser – Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energiemaschinen und Maschinenlabor

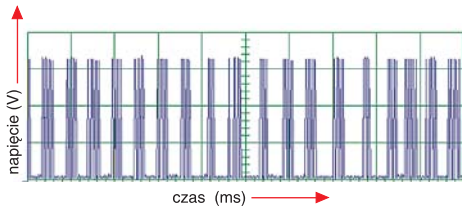
W impulsowej metodzie echa mogą być wykorzystywane następujące rodzaje sygnałów:

- amplitudy echa od przepływających cząstek, przedstawione na rys. 2



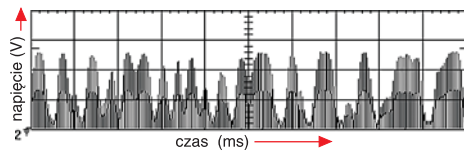
Rys. 2. Zarejestrowane amplitudy echa od przepływających cząstek dla strumienia powietrza $q_v = 2$ l/h

- czasy przejścia echa od cząstek fazy gazowej, przedstawione na rys. 3



Rys. 3. Zarejestrowane czasy przejścia echa od cząstek fazy gazowej dla strumienia powietrza 3 l/h oraz TB = 50 ms

- echa od tylnej ścianki zbiornika, przedstawione na rys. 4.



Rys. 4. Zarejestrowane echa od tylnej ścianki zbiornika dla strumienia powietrza 12 l/h oraz TB = 50 ms

Koncepcja stanowiska pomiarowego do badania przepływów dwufazowych ciecz-gaz

W porównaniu z badaniami materiałów, w przepływie dwufazowym faza gazowa znajduje się w ruchu, dlatego też do analizy przepływów jest wymagana ciągła rejestracja sygnałów. Cząstki fazy gazowej poruszają się po torach, które zazwyczaj nie są liniami prostymi, a przepływ jest zmienny w czasie i przestrzeni.

Do analizy ruchu należy zastosować kilka czujników ultradźwiękowych rozmieszczonych wzdłuż drogi przepływu, wykorzystując do rejestracji sygnałów analogowe wyjście z defektoskopu ultradźwiękowego o zakresie 0 – 5 V. Tak dobrany układ pomiarowy powinien umożliwić wyznaczenie następujących parametrów przepływów dwufazowych:

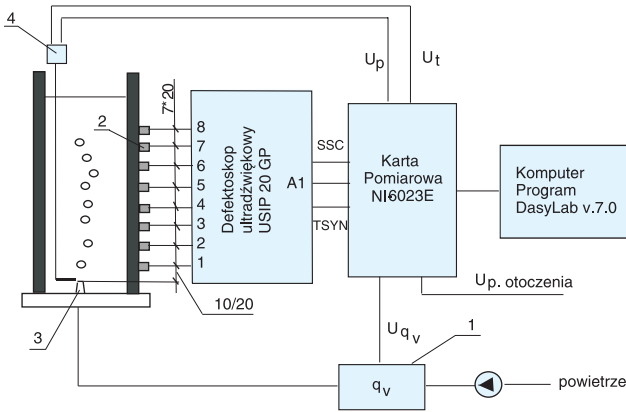
- miejscowej, kierunkowej i średniej prędkości cząstek fazy gazowej
- średnicy przepływających cząstek
- koncentracji (udziału) cząstek fazy gazowej
- konturu przepływających cząstek.

W dotychczasowych pomiarach do rejestracji sygnałów wykorzystywano dwie głowice ultradźwiękowe firmy Kratkrämer K15K o częstotliwości 15 MHz. Analogowe sygnały były wyświetlane i próbkowane za pomocą oscyloskopu cyfrowego DSO 400 firmy Gould, a następnie rejestrowane przez komputer. Do komunikacji komputera z oscyloskopem służył program Transition v.2.20.03, a do obróbki sygnałów – program Famos v.3.0 firmy IMC. Uzyskane wyniki pomiarowe zostały przedstawione w [5]. Podstawową wadą tak przeprowadzonych pomiarów było to, iż optymalny czas rejestracji sygnałów t_M wynosił 2 s (okres próbkowania $\delta_t = 4$ ms). Jak pokazano w pracy [6], w celu uzyskania reprezentatywnych wyników należało przeprowadzić serię ok. 30 pomiarów – całkowity czas trwania takich pomiarów był dłuższy niż 2 min. Zwiększenie czasu obserwacji sygnałów ponad 2 s. powodowało, iż nie wszystkie przepływające cząstki fazy gazowej zostały rejestrowane. Jednocześnie w celu obliczenia prędkości przepływu musiał zostać zachowany następujący warunek pomiarowy: $IFF \cdot TB / 50 = 1, 3, 5$ itd., gdzie IFF – częstotliwość powtarzania impulsów ultradźwiękowych, $t_M = 10 \cdot TB$.

Powyższe trudności pomiarowe spowodowały, iż w nowym wariantcie pomiarów do rejestracji sygnałów zastosowano kartę pomiarową NI 6023E (200 kS/s, 12 bit) wraz z oprogramowaniem DASYLab. Karta pomiarowa była sterowana sygnałami „TSYN” i „SSC” z defektoskopu ultradźwiękowego USIP 20GP. Tak zbudowany system pomiarowy z 8 głowicami ultradźwiękowymi, komputerem PC (513 MB, 40 GB), z procesorem Atlon 1600+ i 4 analogowymi wyjściami z defektoskopu ultradźwiękowego umożliwia, teoretycznie jednoczesny pomiar 32 wielkości. Dla czasu rejestracji sygnałów 180 s ilość danych pomiarowych rejestrowanych przez jedną głowicę ultradźwiękową wynosiła 180 000, co dla ośmiu kanałów pomiarowych odpowiada ok. 1 440 000 wartościom. Przy częstotliwości tworzenia się pęcherzy fazy gazowej 5 – 50 Hz do analizy można otrzymać od ok. 900 – 9000 cząstek.

Stanowisko pomiarowe

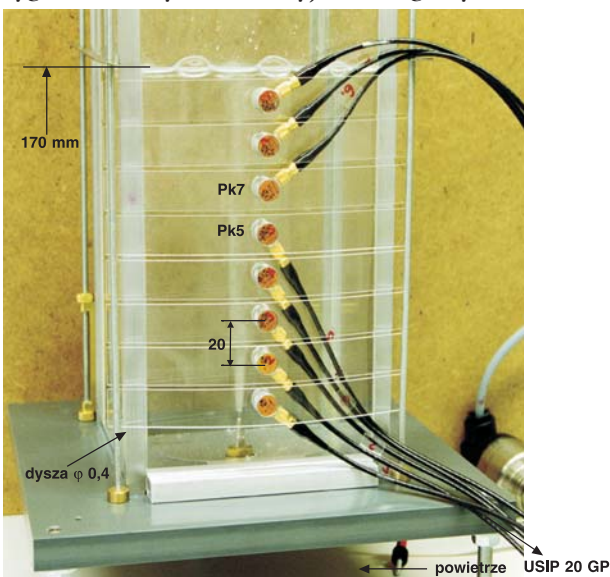
Rys. 5 przedstawia ideowy schemat stanowiska pomiarowego. Czujniki ultradźwiękowe K15K firmy Krautkrämer, będące jednocześnie nadajnikami i odbiornikami fal umieszczono 10 mm lub 20 mm nad dyszą wlotową do zbiornika (o wymiarach 130*130 mm² i wysokości napełnienia 170 mm nad dyszą), w odległości co 20 mm od siebie. Regulację strumienia objętości wykonywano za pomocą przepływomierza MASS-FLO firmy MKS o klasie 1, wykorzystującego do pomiaru czujnik cieplny. W pomiarach wykorzystywano tylko metodę czasu przelotu echa od cząstek fazy gazowej,



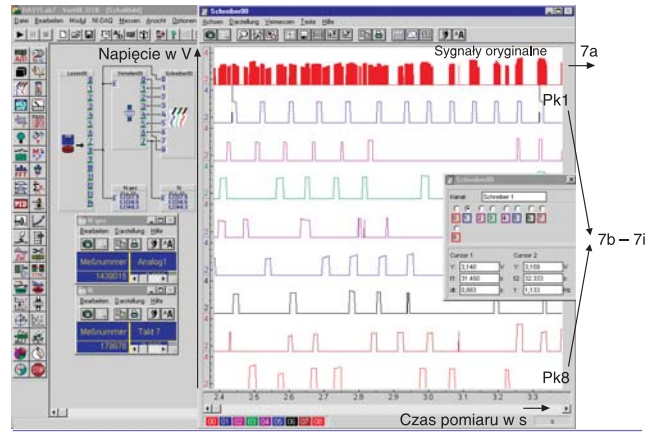
Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 - pomiar strumienia objętości powietrza – przepływomierz MKS-MASS FLO o zakresie pomiarowym 0–12 l/h przy 0 °C/760 Tr, 2 - czujniki ultradźwiękowe, 3 - dysza wlotowa powietrza, 4 - termoelement typu K oraz przetwornik ciśnienia 0–100 mbar

gdź dla niej najkorzystniejszy był stosunek sygnału do szumu oraz umożliwiała ona precyzyjne określenie konturu przepływających cząstek. Częstotliwość powtarzania impulsów wynosiła 8000 Hz, a wzmocnienie sygnału 87 dB. Rys. 6 przedstawia widok zbiornika pomiarowego z czujnikami ultradźwiękowymi.

Rys. 7 przedstawia moduł programu DASYLab wraz z przykładowymi sygnałami od przepływających cząstek. Jak już wcześniej wspomniano do rejestracji sygnałów wykorzystano jedno wyjście analogowe z defektoskopu USIP 20 GP – rys. 7a przedstawia oryginalne (ze wszystkich 8 głowic) sygnały pomiarowe. Na rys. 7b -7i przedstawiono sygnały rejestrowane przez każdą z 8 głowic pomiarowych, uzyskane za pomocą modułu „demultiplexer” programu DASYLab (blok ten jest zaznaczony jako „verteilen”). Należy zaznaczyć, iż zastosowanie tylko jednego wyjścia analogowego do rejestracji sygnałów i wykorzystanie modułu „demultiplexer” znacznie ograniczyło koszty wykonania stanowiska, jakie wynikałyby z wykorzystania do analizy sygnałów wszystkich 8 wyjść analogowych.



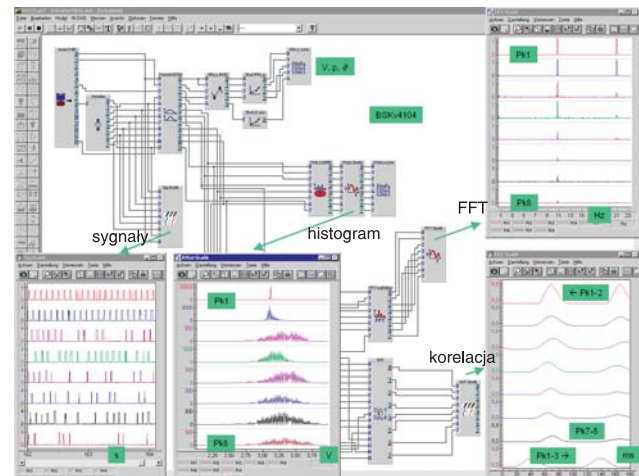
Rys. 6. Zbiornik pomiarowy z czujnikami ultradźwiękowymi umieszczonymi w kierunku cząstek fazy gazowej; Pk - głowice ultradźwiękowe



Rys. 7. Moduł programu DasyLab wraz z sygnałami pomiarowymi dla strumienia objętości fazy gazowej 0,5 l/h przy 0 °C i 760 Tr i średnicy dyszy wylotowej $\varphi = 0,3$ mm. Częstotliwość powtarzania impulsów 8000 Hz, czas pomiaru 180 s, głowice pomiarowe ustawiono 10/30...150 mm nad dyszą wlotową powietrza

Na rysunku tym pokazano również ilość danych pomiarowych ze wszystkich 8 czujników (N-ges) i ilość danych rejestrowanych przez jeden czujnik (N).

Przykładowe wyniki pomiarowe



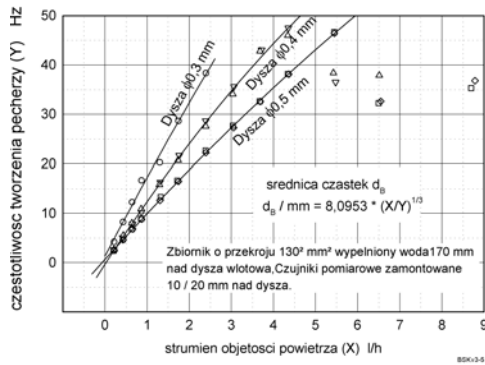
Rys. 8. Diagram systemu programu DasyLab wraz z przykładami wyników pomiarowych

Rys. 8 przedstawia diagram programu DASYLab wraz z przykładami wyników pomiarowych. Częstotliwość tworzenia się pęcherzy została obliczona poprzez funkcję szybkiej transformaty Fouriera FFT. Znając wartość częstotliwości f_B dla łańcuchowego tworzenia się pęcherzy, można wyznaczyć średnicę cząstek fazy gazowej z równania:

$$d_B = \sqrt[3]{\frac{6q_v}{\pi f_B}} = 8,0953 \sqrt[3]{\frac{q_v}{f_B}}$$

w którym q_v (l/h), f_B (Hz). Rys. 9 przedstawia uzyskaną charakterystykę częstotliwości tworzenia się pęcherzy fazy gazowej przy wylocie z dysz o średnicach 0,3 mm, 0,4 mm i 0,5 mm, w zależności od strumienia objętości powietrza.

Prędkość cząstek fazy gazowej obliczano, wykorzystując unormowaną funkcję korelacji wzajemnej między sygnałami z czujników od 1 – 8 w postaci równania:



Rys. 9. Częstość tworzenia się pęcherzy w funkcji strumienia objętości fazy gazowej dla trzech średnic dysz wlotowych

$$\rho_{x_i x_{i+1}} = \frac{R_{x_i x_{i+1}}(t)}{\sqrt{R_{x_i x_i}(0) R_{x_{i+1} x_{i+1}}(0)}} \quad i = 1 \dots 7.$$

Prędkość cząstek wyrażała się wzorem:

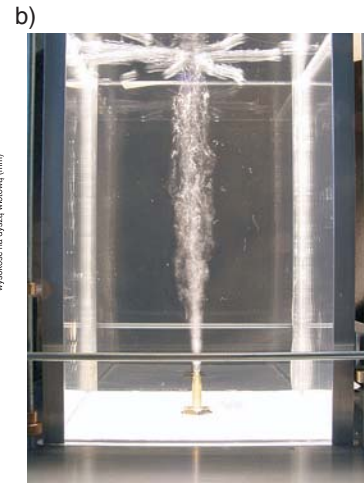
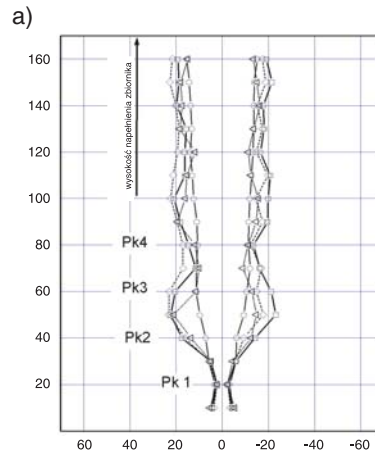
$$w_B = \frac{L}{\tau^*}$$

gdzie τ^* odpowiada maksimum unormowanej funkcji korelacji.

Przykładowe funkcje korelacji przedstawia moduł „korelacja” na rys. 8. Natomiast moduł „histogram” przedstawia rozkład cząstek fazy gazowej. Z uzyskanych danych można wyznaczyć kontur przepływu fazy gazowej, zakładając np. iż scharakteryzowany jest on przez średnią wartość napięcia rejestrowanego od przepływających cząstek i odchylenie standardowe na poziomie ufności $\alpha = 95\%$. Przykładowe kontury przepływu dla dyszy $\phi = 0,5$ mm wraz ze zdjęciem ruchu cząstek przedstawiono na rys. 10.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania ultradźwiękowej metody defektoskopowej wraz ze środowiskowym programem DASYLab w badaniach przepływów dwufazowych ciecz-gaz. W porównaniu z innymi sposobami identyfikacji tych przepływów np. sondami oporowymi, pojemnościowymi, przewodnościowymi metody ultradźwiękowe są nie do końca rozwinięte i rozpowszechnione. Ich podstawową zaletą jest to, iż nie ingerują w przepływ, nie zaburzają go, nadają się do pomiarów w mediach przewodzących, nieprzewodzących, przezroczystych i nieprzezroczystych, np. ciekłych metalach. Przeprowadzone pomiary umożliwiają pełną identyfikację przepływów wzdłuż drogi przepływu fazy gazowej, istnieje również możliwość pomiaru w kierunku prostopadłym do przepływu. Wykorzystując wszystkie 4 wyjścia analogowe z defektoskopu USIP20 GP wraz z 8 głowicami ultradźwiękowymi typu K15K, można jednocześnie mierzyć 32 wielkości. W pomiarach wykorzystano tylko jedno



Rys. 10. Przykładowe kontury przepływu cząstek fazy gazowej: a) q_v – strumień objętości, f_B – częstość tworzenia się pęcherzy, d_B – obliczona średnica cząstek, w – średnia prędkość na drodze 140 mm, b) zdjęcie ruchu cząstek fazy gazowej dla strumienia gazu $q_v = 3$ l/h i średnicy dyszy wlotowej $\phi = 0,5$ mm

	q_v (l/h)	f_B (Hz)	d_B (mm)	w_B (mm/s)
Δ	0,65	7,0	3,69	281
\square	1,32	12,8	3,79	290
\diamond	2,40	22,5	3,84	307
\circ	4,40	37,8	3,94	346

wyjście analogowe sygnałów, co wraz z modułem „demultiplexer” programu DASYLab pozwoliło na znaczne obniżenie kosztów systemu. W czasie pomiarów trwających 180 s, możliwe jest jednoczesne uzyskanie nawet ok. 9000 sygnałów od przepływających cząstek – pozwala to na uzyskanie reprezentatywnych wyników obliczeniowych. Odpowiednie wykorzystanie modułów programu DasyLab umożliwia jednoczesne uzyskanie informacji o prędkości przepływu, częstości tworzenia się pęcherzy gazowych oraz określenie drogi przepływu cząstek.

Bibliografia

1. A. Śliwiński, *Ultradźwięki i ich zastosowania*, WNT Warszawa 2001.
2. J. Obraz, *Ultradźwięki w technice pomiarowej*, WNT Warszawa 1989.
3. R. Ulbrich, *Identyfikacja przepływu dwufazowego gaz-ciecz*, WSI w Opolu, Studia i monografie z. 32, Opole 1989.
4. H. Brauer, *Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen*, Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt am Main 1971.
5. A. Andruszkiewicz, E. Kaiser, H.-D. Sommerlatt, *Zastosowanie defektoskopu ultradźwiękowego do pomiaru prędkości przepływów dwufazowych ciecz-gaz*, *Elektronizacja* 23 (2003) nr 9, s. 14-16.
6. H.-D. Sommerlatt, E. Kaiser, *Ultraschall-Werkstoffprüftechnik für Untersuchung an Fluid-Strömungen mit Blasen/Partikeln*, TM – Technisches Messen, München 71 (2004) H. 12, S. 651-659. ■