

Wykrywanie nieciągłości w przepływie dwufazowym woda-powietrze metodą defektoskopii ultradźwiękowej

Detection of discontinuities in water-air two-phase flow using ultrasonic flow detection

PIOTR KRZYSZTOF SYNOWIEC, WIESŁAW WĘDRYCHOWICZ, ELŻBIETA WRÓBLEWSKA, ARTUR ANDRUSZKIEWICZ, PIOTR PIECHOTA, GRZEGORZ BETKIER

DOI 10.36119/15.2025.7-8.4

Tematyka artykułu dotyczy możliwości wykorzystania metody defektoskopii ultradźwiękowej do wykrywania nieciągłości w przepływie dwufazowym woda – powietrze. Opisano w nim zasadę pomiarową, sposób testowania układu pomiarowego, a następnie przedstawiono przykładowe wyniki badań dla poziomego przepływu: pęcherzykowego, korkowego rzutowego. Przedstawiona metoda pozwala na wyznaczenie szeregu wielkości charakterystycznych dla przepływu dwufazowego, a mianowicie: rozkładu fazy gazowej wysokości i długości korka czy prędkości fazy gazowej. Można również wyznaczyć udział objętościowy fazy gazowej w przepływie. Wykorzystując wiele czujników ultradźwiękowych zamontowanych w jednej płaszczyźnie pomiarowej można zbudować układ tzw. tomografii ultradźwiękowej.

Słowa kluczowe: defektoskopia ultradźwiękowa, pomiar przepływu, przepływ dwufazowy, niepewność pomiaru.

The article focuses on the application of ultrasonic flow detection for identifying discontinuities in water-air two-phase flow. It details the measurement principle and the methodology for testing the measurement system. The paper then presents exemplary research results for horizontal flow regimes: bubbly flow and slug flow.

This method enables the determination of several key parameters characteristic of two-phase flow, specifically: gas phase distribution, slug height and length, and gas phase velocity. Furthermore, the void fraction of the gas phase in the flow can also be determined. By utilizing multiple ultrasonic sensors mounted in a single measurement plane, an ultrasonic tomography system can be constructed.

Keywords: ultrasonic flow detection, flow measurement, two-phase flow, measurement uncertainty.

Wstęp

W wodnych instalacjach przepływowych zdarza się, że w przepływie występuje druga faza – powietrze. Zazwyczaj jest ona fazą szkodliwą i powoduje zakłócenie wskazań przepływomierzy zainstalowanych na przewodach przepływowych dochodzących nawet do kilkunastu procent. Pojawienie się tej fazy może również spowodować przerwę w pracy przepływomierzy, jak to się dzieje w przypadku mierników ultradźwiękowych, gdzie pęcherze gazowe powodują tłumienie fal ultradźwiękowych przesyłanych przez głowice. W takim przypadku nie-

możliwe jest wykonanie pełnego bilansu wody w instalacji lub taki bilans obarczony będzie dużymi błędami.

Znane są różne metody pomiarów parametrów przepływów dwufazowych. Do metod kontaktowych należą m.in. sondy kontaktowe – izokinetyczne, pojemnościowe, rezystancyjne czy termooanemometryczne [1,2]. Ważną grupę sposobów pomiaru zajmują metody bezkontaktowe np. optyczne LDA, PIV [3,4] czy metody tomografii rentgenowskiej [5,6]. Zaletą bezkontaktowych metod pomiarów jest to, że nie ingerują one w przepływ, nie powodują dodatkowych oporów przepływu i start ciśnienia. Do metod bezkontaktowych

zaliczają się również metody ultradźwiękowe: dopplerowska (UDV) oraz defektoskopowa – impulsowa metoda echa (UTTT). Podstawową zaletą tych metod jest możliwość wykorzystania w dwufazowych przepływach nieprzeźroczystych np. ciekły metal – gaz np. w odlewnictwie do napowietrzania ciekłego metalu argonem. Prace nad zastosowaniem metody UDV prowadzone były w Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf, a wyniki przedstawione m.in. w pracach [7,8].

Pierwsze prace związane z wykorzystaniem defektoskopowej impulsowej metody echa UTTT w badaniach przepływów dwufazowych prowadzili Hofmann,

dr inż. Piotr Krzysztof Synowiec <https://orcid.org/0000-0002-7750-4931>,

dr inż. Wiesław Wędrychowicz <https://orcid.org/0000-0001-7437-6527>, dr inż. Elżbieta Wróblewska <https://orcid.org/0000-0002-6486-6722>,

prof. dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz <https://orcid.org/0000-0001-6401-125X>, dr inż. Piotr Piechota <https://orcid.org/0000-0002-1447-320X>

– Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechniki Wrocławskiej, Katedra Techniki Ciepłej

mgr inż. Grzegorz Betkier – Absolwent Wydziału Mechaniczno-Energetycznego.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: e.wroblewska@pwr.edu.pl

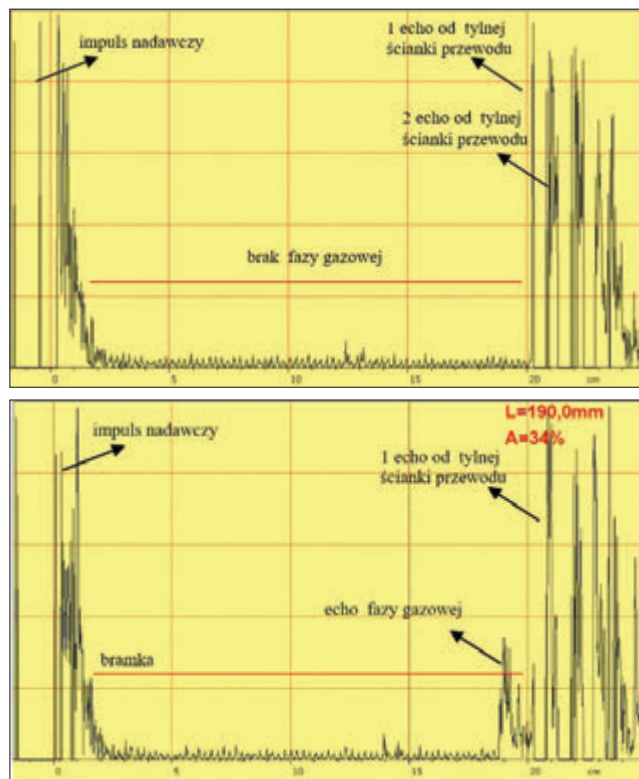
Rockstroh i Kaiser w TU Dresden [9,10]. Następnie kontynuowali i rozwijali je Andruskiewicz, Sommerlatt przedstawiając uzyskane wyniki badań w artykułach [11,12,13,14]. Głównym celem prowadzonych badań było zastosowanie tej metody w badaniach przepływu fazy gazowej – argonu w zbiorniku wypełnionym ciekłym metalem GaInSn. Do zbierania sygnałów wykorzystano defektoskop ultradźwiękowy USIP40 wraz z 10 czujnikami ultradźwiękowymi o częstotliwości 15 MHz. Prace nad wykorzystaniem defektoskopowej – ultradźwiękowej metody echa kontynuowano dalej na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. Ich efektem była budowa przez firmę Ultra 6-kanalowego defektoskopu ultradźwiękowego CUD K6 z możliwością podłączenia 6 czujników ultradźwiękowych o częstotliwości $f = 6$ MHz i wykorzystujących metodę czasu przelotu echa. Układ pomiarowy wykorzystany został w pomiarach przepływów dwufazowych woda – powietrze w przewodzie poziomym i pionowym dla różnych struktur przepływu. Celem artykułu jest pokazanie możliwości zastosowania metody defektoskopowej w wykrywaniu nieciągłości w przepływie dwufazowym woda – powietrze wraz z wyznaczeniem prędkości, rozkładu fazy gazowej w przekroju przewodu, a w przepływie korkowym dodatkowo wyznaczenie wysokości korka.

Zasada pomiaru

Zasada pomiaru wykorzystująca defektoskopię ultradźwiękową szczegółowo została przedstawiona w pracach [15,16]. Na rysunku 1 zamieszczono przykładowe echogramy przepływających w przewodzie poziomym pęcherzy gazowych wyjątkowo zasadę pomiarową. Na pierwszym rysunku pokazane są impuls nadawczy oraz echa od tylnych ścianek zbiornika – w obszarze badanym wyznaczonym przez „bramkę” nie ma fazy gazowej. Na drugim rysunku widać echo fazy gazowej, która znajduje się bliżej tylnej ścianki zbiornika. Amplituda echa przewyższa wysokość „bramki”, więc układ zarejestruje czas przelotu impulsu ultradźwiękowego (echa) na drodze czujnik ultradźwiękowy – faza gazowa – czujnik ultradźwiękowy.

Znając czas przelotu echa od fazy gazowej t_{efg} oraz prędkości fali ultradźwiękowej w materiale przewodu c_s i w wodzie c_l można wyznaczyć jej odległość od czujnika ultradźwiękowego lub tylnej ścianki przewodu. Korzystniejsze jest wyznaczenie odległości fazy gazowej od tylnej ścianki przewodu gdyż do jej wy-

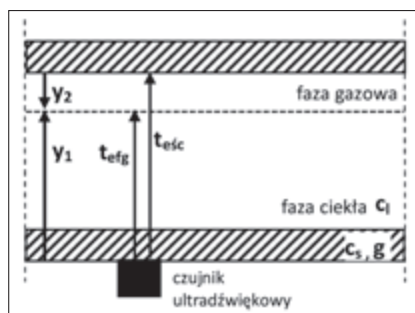
Rys. 1. Przykładowe echogramy
Fig. 1. Example echograms



znaczenia nie trzeba znać prędkości fali ultradźwiękowej w ściance zbiornika. Przedstawia to równanie 1, a wielkości obliczeniowe zaznaczono na rysunku 2.

$$y_2 = c_1 \cdot \frac{(t_{esc} - t_{efg})}{2} \quad (1)$$

Znając dalej średnicę wewnętrzną przewodu oraz grubość jego ścianki można łatwo obliczyć odległość fazy gazowej od czujnika ultradźwiękowego.



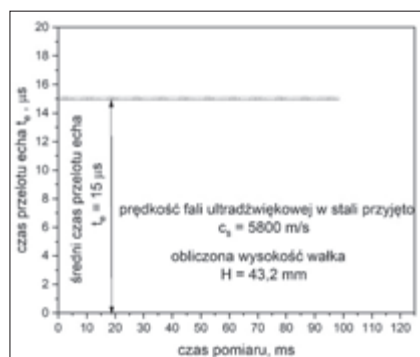
Rys. 2. Wielkości niezbędne do wyznaczenia odległości fazy gazowej od tylnej ścianki zbiornika lub od czujnika ultradźwiękowego
Fig. 2. Quantities necessary for determining the distance of the gas phase from the rear wall of the tank or from the ultrasonic sensor

Testowanie defektoskopu ultradźwiękowego CUD K6

W celu sprawdzenia prawidłowości wskazań defektoskopu ultradźwiękowego CUD K6 przeprowadzono kontrolny



Rys. 3. Zdjęcia układu testującego wraz z pomiarem wysokości wałka suwmiarką [17]
Fig. 3. Images of the test setup with roller height measurement using a caliper [17]



Rys. 4. Rejestrowane czasy przelotu echa wzdłuż wysokości wałka stalowego [17]
Fig. 4. Recorded echo transit times along the height of the steel roller [17]

miar wysokości wałków stalowych. Zdjęcie układu testującego oraz zmierzoną wartość wysokości przedstawia rysunek 3. Rysunek 4 przedstawia natomiast rejestrowane sygnały pomiarowe.

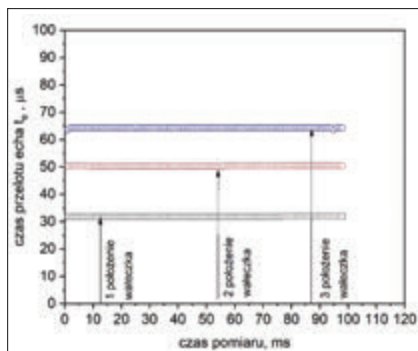
Zmierzona suwmiarką elektroniczną wysokość wałka stalowego wynosi $H_{zm} = 43,01$ mm. Stąd różnica pomiarowa wynosi 0,2 mm, a wynika ona z przyjętej do obliczeń prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w badanej stali. Kolejnym etapem badań było sprawdzenie zmian odległości waleczka zanurzonego w zbiorniku wypełnionym wodą od czujnika ultradźwiękowego, wg rysunku 5. Pokazano na nim także echogram dla badanego waleczka.

Warto zauważyć, że na echogramie brakuje echa od tylnej ścianki zbiornika, co jest w tym przypadku prawidłowe, gdyż powierzchnia boczna waleczka przykrywa całkowicie czujnik ultradźwiękowy. Rysunek 6 przedstawia zmianę wartości rejestrowanych sygnałów dla trzech wybranych położzeń metalowego waleczka w zbiorniku wypełnionym wodą.

Rysunek ten pokazuje prawidłową odpowiedź układu pomiarowego na zmianę odległości waleczka stalowego od czujnika, a mianowicie zwiększenie czasu przelotu echa t_e [17].



Rys. 5. Zdjęcie stanowiska do pomiaru odległości waleczka stalowego umieszczonego w wodzie od czujnika ultradźwiękowego wraz z przykładowym echogramem [17]
Fig. 5. Photo of the test stand for measuring the distance of a steel roller placed in water from an ultrasonic sensor, along with an example echogram [17]

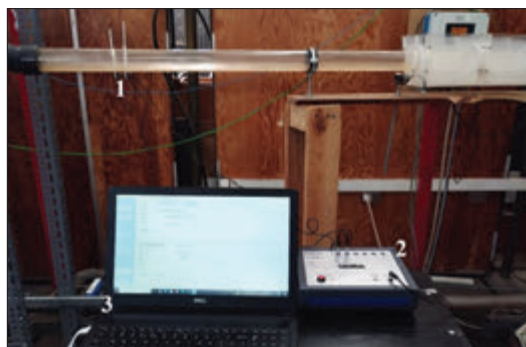


Rys. 6. Rejestrowane sygnały dla różnej odległości waleczka od czujnika ultradźwiękowego
Fig. 6. Recorded signals for varying distances of the roller from the ultrasonic sensor

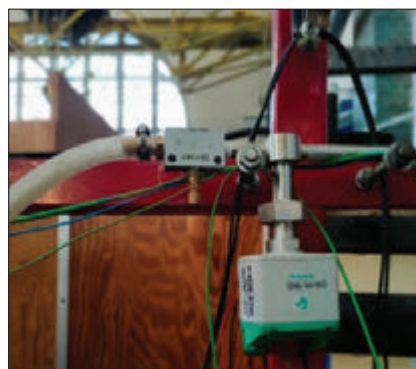
Stanowisko pomiarowe

Na rysunku 7 przedstawiono stanowisko pomiarowe, na którym wykonywano badania. Pokazano na nim przykładowy układ czujników ultradźwiękowych zamontowanych na przewodzie poziomym górnym, dolnym oraz na przewodzie pionowym.

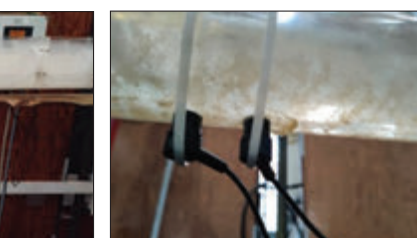
Rysunek 8 przedstawia zdjęcie przepływomierza typu termicznego VA 520-CS



Rys. 7. Schemat stanowiska pomiarowego wraz z przykładowymi pozycjami czujników ultradźwiękowych w przewodzie poziomym i pionowym: 1 – czujniki ultradźwiękowe zainstalowane na przewodzie górnym, 2 – defektoskop ultradźwiękowy, 3 – komputer do zbierania danych pomiarowych
Fig. 7. Schematic of the measurement stand with exemplary positions of ultrasonic sensors in horizontal and vertical pipes: 1 – ultrasonic sensors installed on the upper pipe, 2 – ultrasonic flaw detector, 3 – computer for collecting measurement data



Rys. 8. Zdjęcie przepływomierza termicznego VA 520 – CS oraz króćca do wprowadzania powietrza do rurociągu przepływowego
Fig. 8. Photo of the VA 520-CS thermal flowmeter and the nozzle for introducing air into the flow pipeline



służącego po pomiaru strumienia objętości powietrza wprowadzanego do przewodu pomiarowego oraz króćca do wprowadzania tego powietrza.

Wprowadzając powietrze do przewodu przepływowego uzyskiwano różne struktury przepływu dwufazowego: pęcherzykową, korkową, rzutową czy warstwową. Trzy przykładowe struktury przepływu w przewodzie poziomym pokazane zostały na zdjęciach, na rysunkach 9, 10 i 11.

Czas pomiaru dla każdej ze struktur przepływu wynosił 5 minut, a okres próbkowania sygnałów 2 ms. Odległość między



Rys. 9.
Przepływ pęcherzykowy w przewodzie poziomym
Fig. 9. Bubbly flow in a horizontal pipe



Rys. 10.
Przepływ rzutowy w przewodzie poziomym
Fig. 10. Slug flow in a horizontal pipe

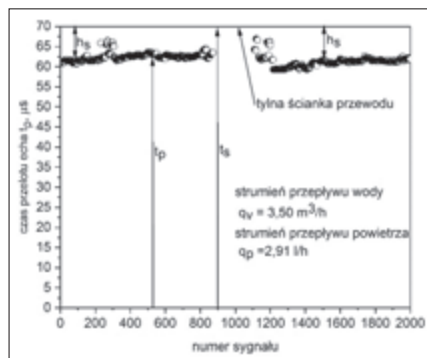


Rys. 11.
Przepływ korkowy w przewodzie poziomym
Fig. 11. Slug flow in a horizontal pipe

czujnikami ultradźwiękowymi ustawiono na 20 lub 30 mm, tak aby uzyskać wyraźny peak w funkcji korelacji wzajemnej sygnałów w celu wyznaczania prędkości fazy gazowej.

Przykładowe wyniki z przeprowadzonych pomiarów

Rysunek 12a przedstawia przykładowe sygnały pomiarowe – czasy przelotu echa w przypadku przepływu korkowego. Widać na nim przerwę rejestrowanych sygnałów co dobrze koreluje ze zdjęciem na rysunku 11. Rysunek 12b przedstawia histogram z otrzymanych wyników pomiarowych. Histogram pokazuje, że przepływ fazy gazowej odbywał się przy górnej ścianie zbiornika.

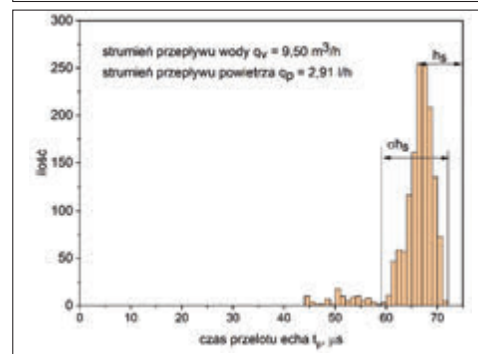
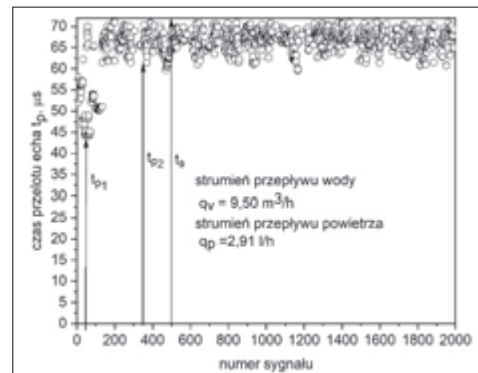
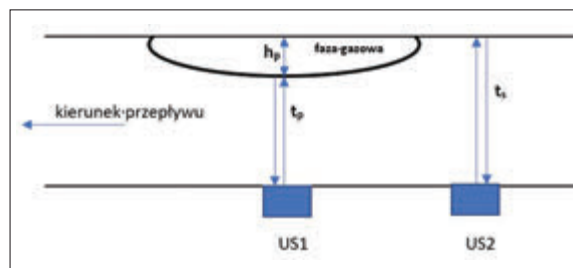


Rys. 12.
Przykładowe sygnały pomiarowe i rozkład fazy gazowej w przypadku przepływu korkowego
Fig. 12. Example measurement signals and gas phase distribution for slug flow

Zaznaczono na nim wielkości h_s i σh_s umożliwiające wyznaczenie średniej wysokości korka $h_p = h_s/2$ i odchylenie standardowe tej wysokości. Poglądowy schemat do wyznaczania wysokości korka przedstawia rysunek 13.

Na rysunku 14 przedstawiono sygnały i rozkład fazy gazowej dla przepływu rzutowego.

Rys. 13.
Poglądowy schemat do wyznaczania wysokości korka
Fig. 13. Conceptual diagram for determining slug height



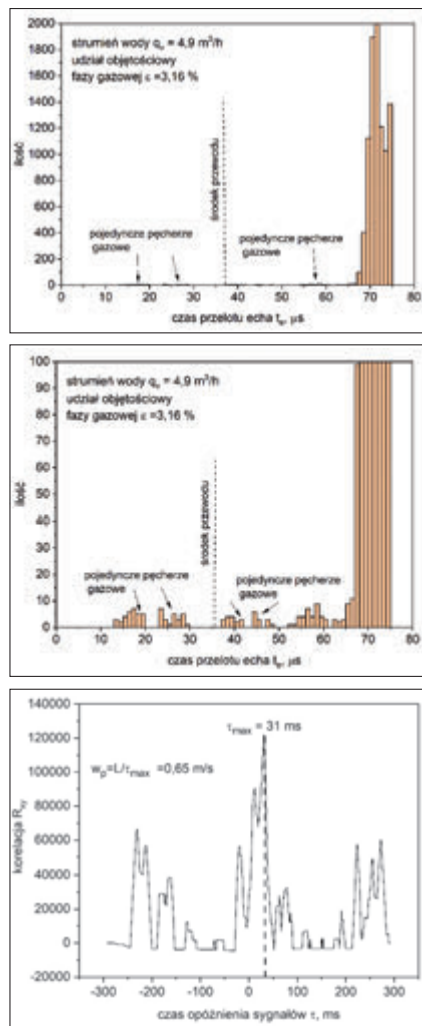
Rys. 14.
Przykładowe sygnały i rozkład fazy gazowej dla przepływu rzutowego
Fig. 14. Example signals and gas phase distribution for slug-projectile flow

Rysunek 15 przedstawia natomiast rozkład fazy gazowej dla przepływu pęcherzykowego. Prawa część tego rysunku została powiększona, aby dokładnie było widać, pojedyncze pęcherze gazowe znajdujące się bliżej czujników ultradźwiękowych, Rysunek ten dobrze koreluje ze zdjęciem przedstawionym na rysunku 9, na którym pęcherze gazowe znajdują się

bliżej pierwszej, wewnętrznej ścianki przewodu. W dolnej części rysunku przedstawiono funkcję korelacji wzajemnej sygnałów z dwóch czujników ultradźwiękowych oddalonych od siebie o $L=20$ mm. Znajomość czasu opóźnienia sygnałów umożliwia wyznaczenie prędkości fazy gazowej, która w tym przypadku wynosi 0,65 m/s.

Podsumowanie

Przedstawione w artykule przykładowe wyniki badań przeprowadzonych



Rys. 15. Przykładowe rozkłady fazy gazowej i funkcja korelacji wzajemnej sygnałów dla przepływu pęcherzykowego
Fig. 15. Example gas phase distributions and cross-correlation function of signals for bubbly flow

z wykorzystaniem defektoskopu ultradźwiękowego i metody czasu przelotu echa pokazują, że jest on dobrym narzędziem do wykrywania nieciągłości w przepływie. Metodę tę można stosować zarówno w przezroczystych jak i nieprzezroczystych układach przepływowych – np. cie-

ły metal – gaz. Stosując metodę echa można wyznaczyć rozkłady fazy gazowej, jej prędkość oraz wysokość pęcherza w przepływie korkowym czy rzutowym. Znając prędkość fazy gazowej oraz czas jej przelotu przez pole ultradźwiękowe metoda echa pozwala również na obliczenie długości korka gazowego. Wykorzystując więcej czujników ultradźwiękowych zamontowanych w jednej płaszczyźnie pomiarowej można zbudować układ obrazujący obszar przepływu fazy gazowej w przewodzie – czyli tzw. system tomografii ultradźwiękowej.

LITERATURA

- [1] M. R. Rzęsa, Ocena możliwości zastosowania tomografii optycznej w badaniu dwufazowych procesów przepływowych, Katowice: Oddział Polskiej Akademii Nauk w Katowicach, 2011.
- [2] Z. Orzechowski, Przepływy dwufazowe jednowymiarowe ustalone adiabatyczne, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1990.
- [3] Deen N, Westerweel J., Delnoij E., 2002. Two – phase PIV in Bubbly Flows: Statut and Trends, Chemical Engineering & Technology, Volume 25 Issue 1, pages 97-101, [https://doi.org/10.1002/1521-4125\(200201\)25:1<97::AID-CEAT97>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/1521-4125(200201)25:1<97::AID-CEAT97>3.0.CO;2-7)
- [4] Saito Y., Mishima K., Tobita Y., Suzuki, M. Matsubayashi, 2004. Velocity field measurement in gas-liquid metal two-phase flow with use of PIV and neutron radiography techniques, Applied Radiation and Isotopes 61, 683-691, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.03.110>
- [5] Lappan T., Sarma M., Heikam S., Mannes D., Triik P., Shevchenko N., Eckert K., Eckert S., X-Ray and Neutron Radiographic Experiments on Particle-Laden Molten Metal Flows, Materials Processing Fundamentals 2021, 13-29, https://doi.org/10.1007/978-3-030-65253-1_2
- [6] Birjukovs M., Triik P., Kaestner A., Hovind J., Klevs M., Gawryluk D., Thomsen K., Jakovics A., Resolving gas bubbles ascending in liquid metal from low-snr neutron radiography images, 13 Sep 2021 arXiv:2109.04883v2 [physics.flu-dyn], 1-36, <https://doi.org/10.3390/app11209710>
- [7] Eckert S., Gerbeth G.: Messung von Geschwindigkeitsfeldern in Flüssigmetallen mit der Ultraschall-Doppler-Methode, Technisches Messen, 79(9), 410-416, 2012, <https://doi.org/10.1524/teme.2012.0265>
- [8] Eckert S., Gerbeth G., Melnikov V.I., Velocity measurements at high temperatures by ultra-

sound Doppler Velocimetry using an acoustic wave guide, Experiments in Fluids, 2003, 35, 381-388, <https://doi.org/10.1007/s00348-003-0606-0>

- [9] Hofmann B. Kaiser E., Experimental determination of motion parameters of gas bubbles rising in a liquid metal. 4th EuroMech Fluid Mechanics Conference, Eindhoven University of Technology, 2003, 4TH EUROMECH Fluid Mechanics Conference
- [10] Hofmann B., Rockstroh M., Two-phase flow measurements by means of the ultrasonic NDT instrumentation and technique, Proceedings the first JOINT Belgian-Hellenic Conference on non destructive testing, Greece 22-23 may 1995, DOI: 10.1016/0041-624X(96)00008-X
- [11] Sommerlatt, H-D., Andruszkiewicz, A. 2008. Dynamic measurement of particle diameter and drag coefficient with ultrasonic method, Archives of Acoustic, 3, 293-304, <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-51949101406&partnerID=MN8TOARS>
- [12] Andruszkiewicz A., Determination of parameters of gas phase moving in liquid metal-gas flow in magnetic field of permanent magnets by ultrasonic pulse echo method, Journal of Engineering Thermophysics, 2021, vol. 30, no. 1, 1-11, <https://doi.org/10.1134/S1810232821010070>
- [13] Sommerlatt H.-D., Kaiser E., Ultraschall-Werkstoffprüftechnik für Untersuchungen an Fluid – Strömungen mit blasen/Partikeln, Technisches Messen, 2004, 71, 651-657, DOI:10.1524/teme.71.12.651.54693
- [14] Andruszkiewicz A., Kaiser E., Sommerlatt H.-D., Zastosowanie defektoskopu ultradźwiękowego do pomiaru prędkości przepływów dwufazowych ciecz-gaz, Elektronizacja, 2003, 9, s. 14-16,
- [15] Andruszkiewicz A., Eckert K., Eckert S., Odenbach S., Gas bubble detection in liquid metals by means of the ultrasound transit-time-technique, The European Physical Journal Special Topics 2013, v. 220, 53-62, <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01805-4>
- [16] Andruszkiewicz A., Kaiser E., Sommerlatt H.-D., Adaptacja metod defektoskopowych do identyfikacji przepływów dwufazowych ciecz – gaz, Pomiary Automatyka Robotyka, 2005, 5, s.5-8, https://www.researchgate.net/publication/371936193_Adaptacja_metod_defektoskopowych_do_identyfikacji_przeplywow_dwufazowych_ciecz-gaz
- [17] Grzegorz Betkier, Badanie wybranych parametrów przepływów dwufazowych ciecz-gaz metodą defektoskopii ultradźwiękowej. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wrocław 2024,