

Analiza wybranych metod pomiaru małego strumienia objętościowego cieczy napływającej do tłoka wodnego

TYMOTEUSZ PIGA , ANDRZEJ RACHALSKI , WALDEMAR WODZIAK , JACEK SOBCZYK 

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

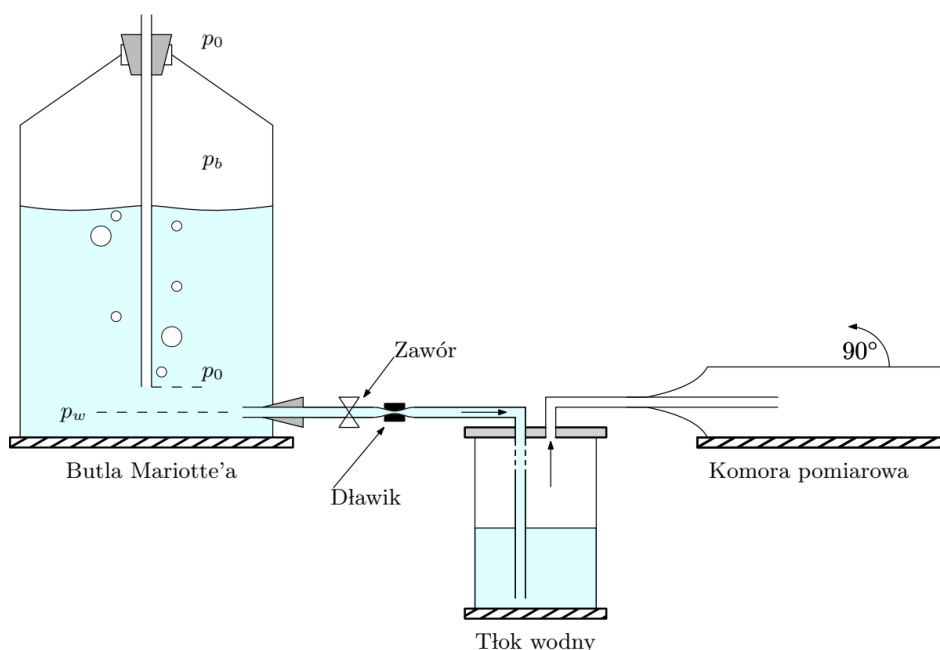
Streszczenie

Wytworzenie kontrolowanego przepływu gazu można zrealizować z wykorzystaniem tłoka wodnego. Technika ta polega na wypieraniu gazu z naczynia przez napływającą do niego ciecz. Określenie średniej prędkości przepływu gazu wytworzonego w ten sposób można zrealizować poprzez pomiar strumienia objętościowego wody wpływającej do naczynia. W pracy przedstawiono trzy sposoby pomiaru tej wielkości: bezpośredni z wykorzystaniem wagi oraz pośrednie z wykorzystaniem pojemnościowego czujnika wysokości lustra wody i manometru różnicowego do pomiaru ciśnienia słupa wody. Pomiar z wykorzystaniem wagi możliwy był tylko dla granicznych chwil czasu pracy układu. Pośredni, nadążny pomiar czujnikami poziomu lustra wody umożliwił wyznaczenie chwilowego strumienia objętościowego wody napływającej do tłoka.

Słowa kluczowe: strumień objętości, bardzo mała prędkość przepływu, tłok wodny

1. Wprowadzenie

Wytworzenie wolnego, stacjonarnego przepływu powietrza z zastosowaniem wentylatorów jest trudnym, a w przypadkach granicznych wręcz niemożliwym zadaniem. W literaturze można znaleźć stanowiska badawcze oparte na metodzie schodzenia wirów [1,2], z zastosowaniem wahadła [3] czy też posuwu [4]. Rozpatrywana w artykule technika z wykorzystaniem tłoka wodnego eliminuje wiele mechaniczno-elek-



Rys. 1. Ogólny schemat stanowiska, p_0 – ciśnienie atmosferyczne, p_b – podciśnienie w butli

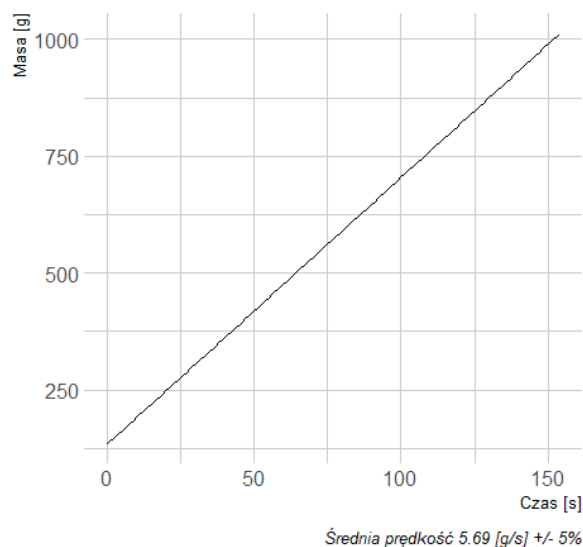
trycznych wad typowych rozwiązań wymuszających przepływ [5]. Prezentowane w artykule stanowisko składa się z trzech podstawowych elementów: butli Mariotte'a, tłoka wodnego oraz komory pomiarowej. Butla Mariotte'a gwarantuje stały wypływ wody do tłoka poprzez utrzymanie stałego ciśnienia p_0 na poziomie końca rurki zanurzonej w wodzie. Podciśnienie p_b kompensuje napór cieczy znajdujący się powyżej jej końca. Przepływ napędzany jest różnicą ciśnień p_w i p_0 . Woda wpływająca do drugiego pojemnika wypiera powietrze (lustro wody tworzy tłok) i przepycha je do komory, w której stały przepływ może być wykorzystany w celach badawczo-wzorczych.

2. Pomiar prędkości wypływu wody

W celu wstępnego oszacowania prędkości przepływu powietrza w przestrzeni pomiarowej wymagany jest ciągły pomiar strumienia objętościowego napływającej do tłoka wody. Dobór poszczególnych elementów stanowiska może być różny w zależności od potrzeb ilościowych – bezpośrednio rzędu wielkości prędkości oraz pośrednio docelowej wykorzystanej objętości wody. W przypadku niewielkiej czynnej objętości wody do określenia średniej prędkości gazu można wykorzystać wagę precyzyjną, jednak jest to ograniczone dynamiką i zakresem pomiarowym urządzenia. Większe prędkości przepływu pozwalają z kolei na wykorzystanie przepływomierzy. Rozwiązaniem niezależnym od tych parametrów jest wykorzystanie precyzyjnego miernika poziomu cieczy w tłoku o znanej geometrii.

2.1. Pomiar wypływu wody z wykorzystaniem wagi

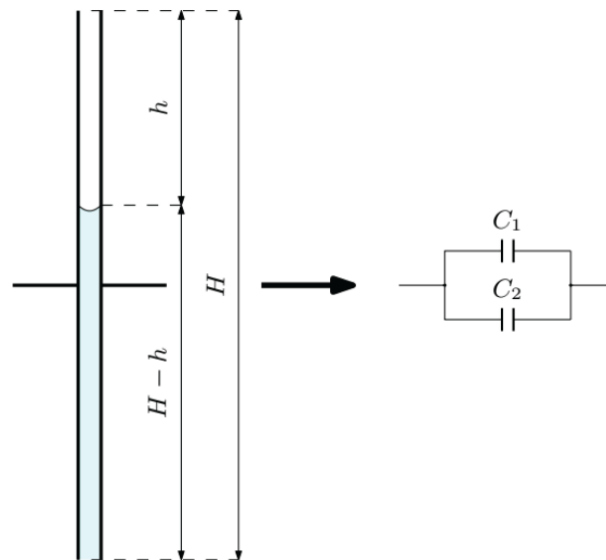
Do badania napływu cieczy do tłoka wykorzystano wagę laboratoryjną *Radwag wlc 2.x2* o zakresie pomiarowym 0÷2 kg. Masę napływającej cieczy w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 2. Prezentowany wykres wykazuje liniową zależność w czasie. Ograniczenie zakresu pomiarowego masy cieczy praktycznie wyklucza jej zastosowanie w warunkach ciągłej pracy układu w dłuższym okresie czasu. Typowe wagi nie są przeznaczone do pomiarów dynamicznych. Wyposażone są w cyfrowe filtry i tłumiki drgań co skutkuje silnym i niekontrolowanym wygładzeniem zmian masy w czasie. To ogranicza ich zastosowanie do wyznaczenia średniego strumienia objętościowego cieczy wykonując pomiar masy układu przed rozpoczęciem pracy i po jej zakończeniu.



Rys. 2. Pomiar masy wypływającej cieczy w czasie

2.2. Pomiar poziomu cieczy z wykorzystaniem czujnika pojemnościowego

Zjawisko pojemności elektrycznej może być wykorzystane do pomiaru zmiany poziomu cieczy. Przestrzeń między okładkami kondensatora może wypełniać zarówno woda jak i powietrze. W miarę wypływu cieczy ze zbiornika, woda w kondensatorze będzie ustępowała miejsca powietrzu, co będzie widoczne w zmianie pojemności kondensatora. Schemat takiego układu został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat pojemnościowego miernika poziomu cieczy

Pojemność kondensatora płaskiego wynosi:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \quad (1)$$

gdzie:

- ε_0 – przenikalność dielektryczna próżni [F/m],
- ε_r – względna przenikalność dielektryczna [-],
- S – pole powierzchni okładek [m²],
- d – odległość między okładkami [m].

W przypadku równoległego połączenia kondensatorów o różnej przenikalności dielektrycznej, można zapisać:

$$C(h) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_p a h}{d} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_w a (H - h)}{d} \quad (2)$$

gdzie:

- $\varepsilon_p, \varepsilon_w$ – względna przenikalność dielektryczna powietrza i wody [-],
- a – szerokość okładek,
- H – długość okładek,
- h – długość okładek powyżej słupa wody.

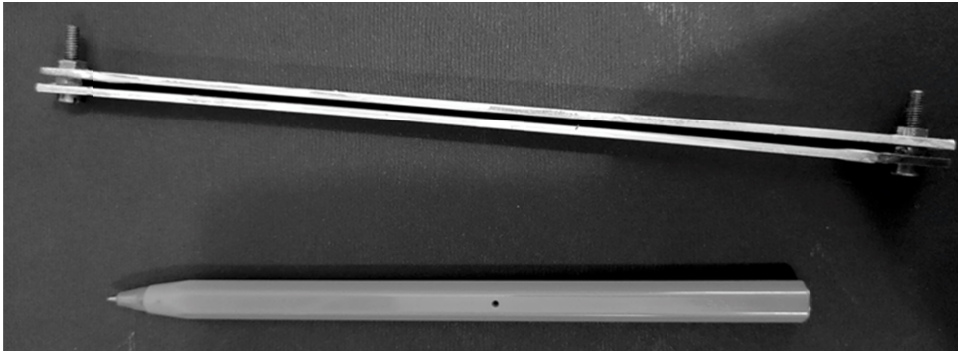
Porządkując stałe w (2) otrzymuje się równanie w postaci:

$$C(h) = \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon_p - \varepsilon_w) a}{d} h + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_w a H}{d} \quad (3)$$

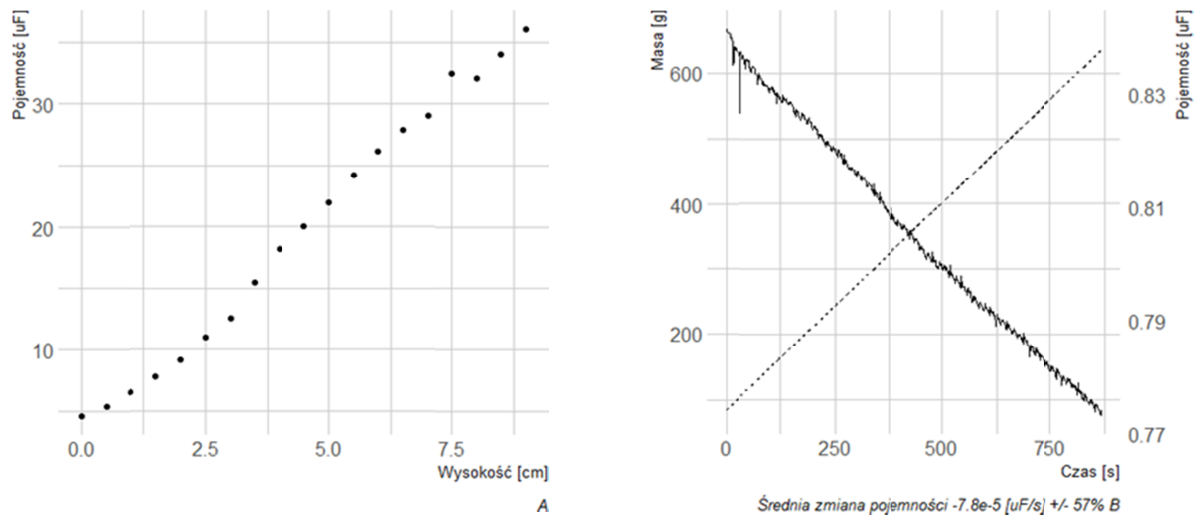
Które upraszczając można zapisać w następujący sposób:

$$C(h) = Ah + B \quad (4)$$

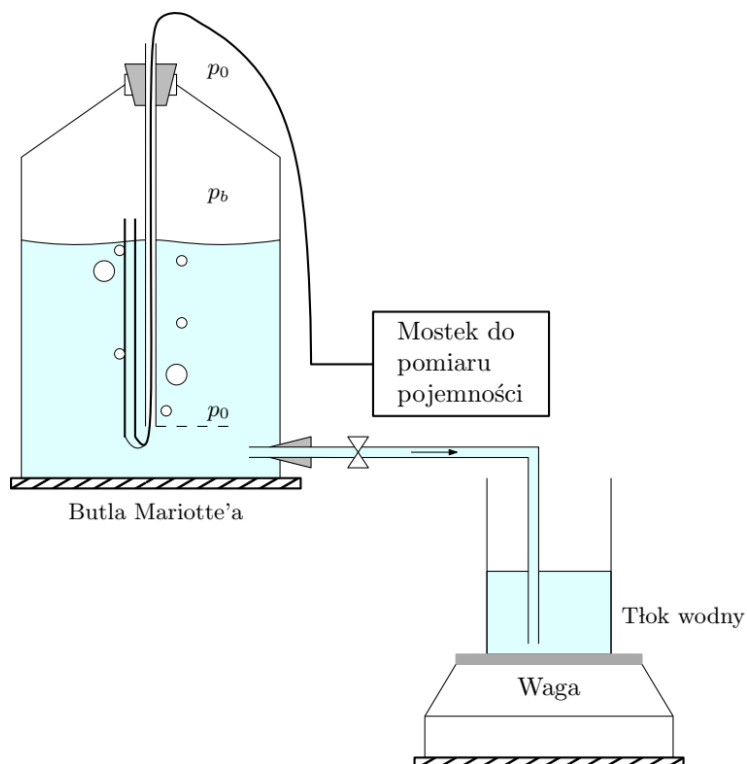
Pojemność kondensatora zależy liniowo od zmiany wysokości cieczy wypełniającej przestrzeń pomiędzy jego okładkami (równanie 3), stąd możliwe jest wzorcowanie takiego przyrządu (na przykład przy użyciu wagi), a następnie ekstrapolacja uzyskanych wyników. Wzorcowanie urządzenia i dopasowania stałych kondensatora A i B (równanie 4) można dokonać z wykorzystaniem regresji liniowej. Takie podejście pozwala na pominięcie czynników zmiennych takich jak: skład wody, temperatura, ciśnienie, wilgotność lub erozja okładek kondensatora. W toku prac zostały wykonane dwa prototypy kondensatorów: kondensator płaski oraz cylindryczny. Kondensator płaski został wykonany z dwóch uciętych kawałków



Rys. 4. Zdjęcie wykonanego kondensatora płaskiego



Rys. 5. Zależność pojemności kondensatora od wypełnienia butli wodą (A – z lewej), zestawienie równoczesnych pomiarów pojemności i masy, (- -) – masa wypływającej wody, (-) – pojemność (B – z prawej)

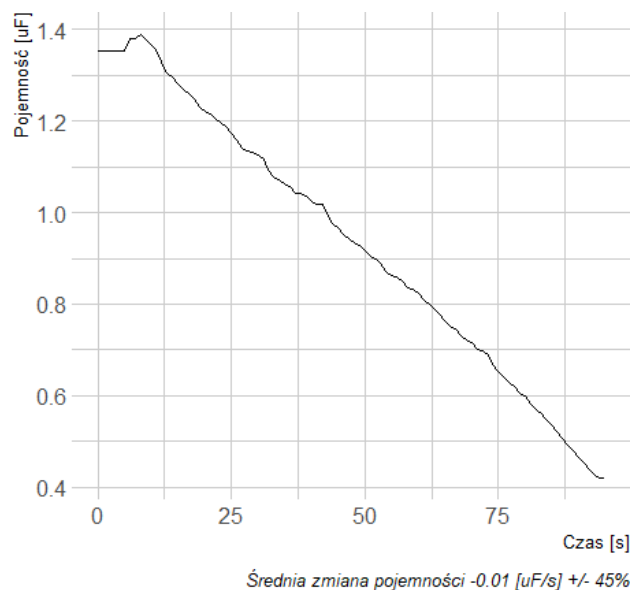


Rys. 6. Układ pomiarowy – kondensator i waga

płyty dwustronnie laminowanej miedzią oraz skręcony mosiężnymi śrubami (Rys. 4). Pomiary pojemności zostały wykonane z wykorzystaniem mostka *Gwinstek LCR 821*, który w trybie automatycznym pozwalał na wykonanie do 13 pomiarów na sekundę.

W pierwszej części testów badana była zależność pojemności kondensatora od wysokości słupa wody (Rys. 5A). Widoczna na rysunku 5A nieliniowość pochodzi od niedokładności wykonania przyrządu. Laminat był lekko powyginany, a skręcenie śrubami wprowadziło dodatkowe naprężenia, które spowodowały odkształcenie okładek. Następnie miernik został przełożony do butli Mariotte'a (Rys. 6).

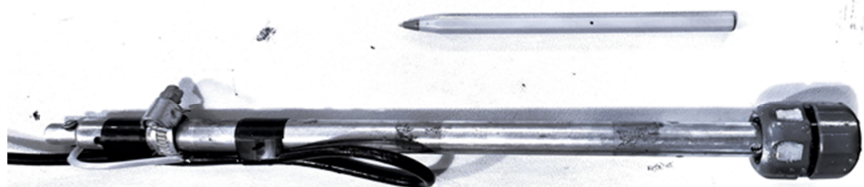
Zmiana pojemności w czasie wraz z masą wypływającej wody z butli Marriotte'a została przedstawiona na wykresie rysunku 5B. Widoczne fluktuacje w ogólnej liniowej tendencji są spowodowane występowaniem pęcherzy powietrza uwalnianych do butli w czasie zlewania wody. Aby wyeliminować część czynników zewnętrznych, okładki kondensatora zostały polakierowane warstwą ochronną oraz oddalone od rurki doprowadzającej powietrze do butli. Zabiegi te poskutkowały zminimalizowaniem zakłóceń zewnętrznych oraz poprawą charakterystyki kondensatora (Rys. 7).



Rys. 7. Zmiana pojemności w czasie – kondensator płaski z warstwą ochronną.

2.2.1. Kondensator cylindryczny

Kondensator cylindryczny został wykonany z miedzianej rury oraz mosiężnego pręta. Połączenia tych elementów zostały wykonane za pomocą części z tworzyw sztucznych. Zewnętrzna okładka została połączona z ekranem kabla koncentrycznego, wewnętrzna natomiast została skręcona śrubą z przewodem (Rys. 8).

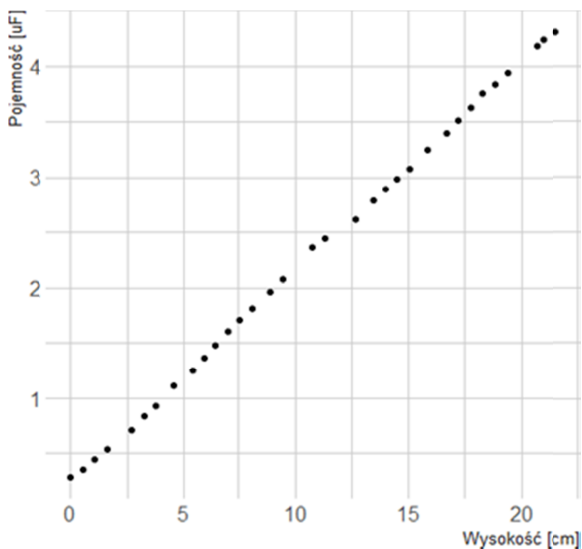


Rys. 8. Kondensator cylindryczny

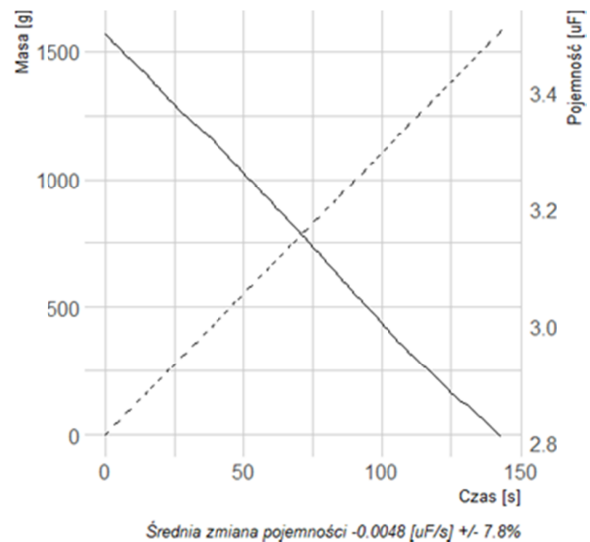
Kondensator ten charakteryzuje się większą pojemnością, a zewnętrzna okładka pełni funkcje ekranu elektrycznego i osłony przed pęcherzami powietrza. Na górze i dole okładki zewnętrznej zostały nawiercone

dziury mające ułatwić swobodny przepływ między okładkami. Wstępne pomiary charakterystyki czujnika zostały wykonane metodą odczytu wysokości poziomu wody z podziałki naczynia (Rys. 9). Następnie przystąpiono do pomiaru pojemności kondensatora umieszczonego w butli Mariotte'a oraz masy wypływającej wody (Rys. 10)

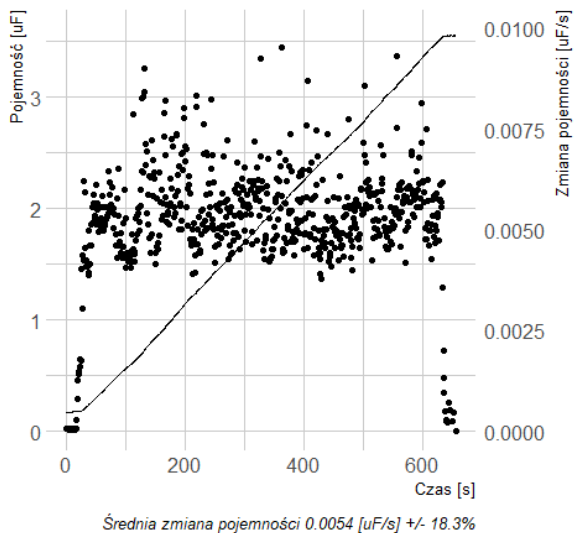
Następnie umieszczono czujnik w tłoku wodnym i wykonano serie pomiarów wypływu wody z butli Mariotte'a z różną nastawą zaworu ograniczającego przepływ wody. W pierwszej kolejności wykonano pomiar dla bardzo niskiej prędkości wpływu wody do tłoka z butli Mariotte'a (Rys. 11). Rysunek 12 prezentuje średnią zmianę pojemności dla maksymalnie otwartego zaworu.



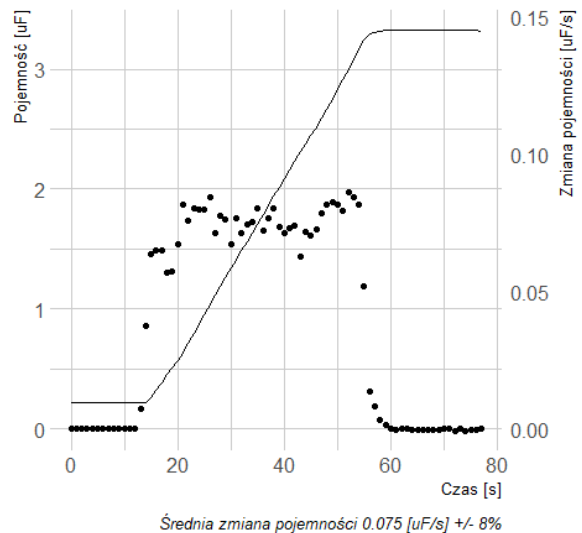
Rys. 9. Wykres zależności pojemności kondensatora w funkcji poziomu lustra wody



Rys. 10. Zmiana pojemności w wyniku wypływu wody z butli. (- -) – masa wypływającej wody [g]
(-) – pojemność kondensatora [uF]



Rys. 11. Wolna zmiana poziomu lustra wody. (-) – pojemność kondensatora w funkcji czasu,
(·) – zmiana pojemności w czasie

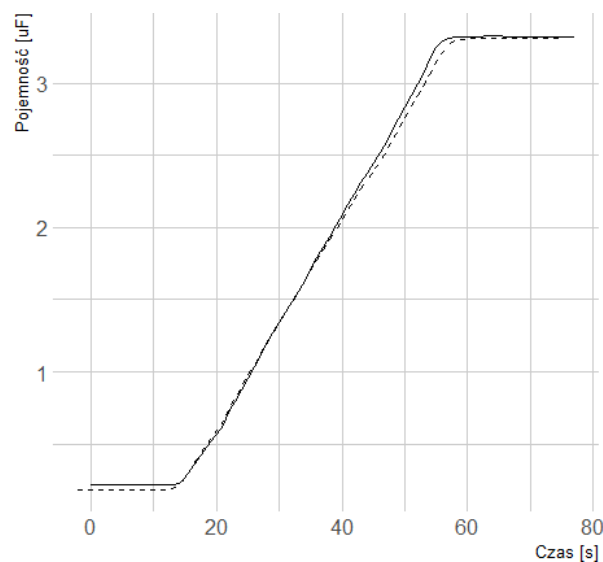


Rys. 12. Szybka zmiana poziomu lustra wody. (-) – pojemność kondensatora w funkcji czasu,
(·) – zmiana pojemności w czasie

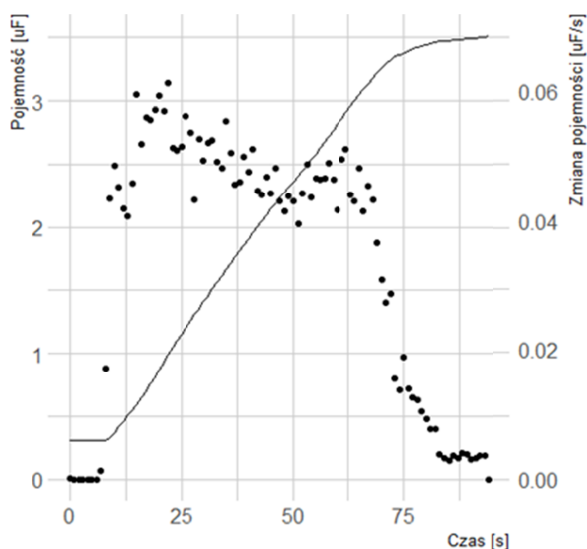
Na rysunkach 11 oraz 12 zostały przedstawione zmiany pojemności kondensatora w czasie. Stałość pochodnej wskazuje na równomierny przyrost poziomu lustra wody. W porównaniu z kondensatorem płaskim, widoczna jest zauważalna poprawa charakterystyki czujnika, dużo stabilniejsza zależność o charakterze liniowym oraz mniejszy rozrzut punktów pomiarowych.

Powyższe wyniki wskazują, że sposób pomiaru prędkości z wykorzystaniem pojemności wiąże się ze znacznym rozrzutem danych wokół średniej. Względne odchylenie standardowe wynosi od 8% do 20%. W celu sprawdzenia powtarzalności wyników wykonano drugi pomiar dla maksymalnego otwarcia zaworu (Rys. 13). W kolejnym kroku sprawdzono działanie miernika pojemnościowego dla swobodnego apływu wody do tłoka (Rys. 14) oraz swobodnego wypływu wody z tłoka (Rys. 15), bez wykorzystania butli Mariotte'a.

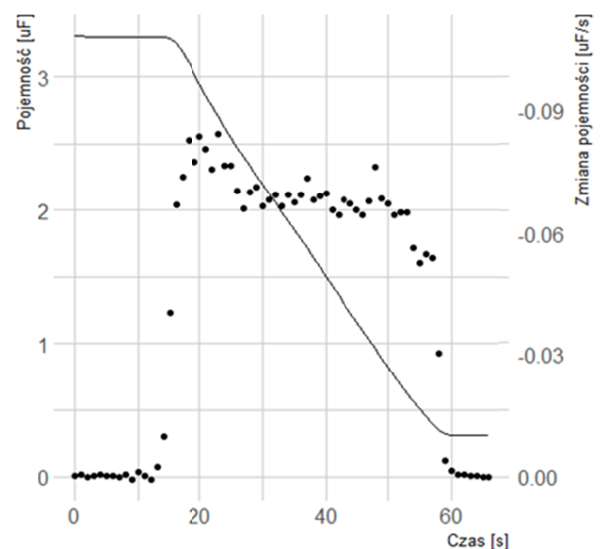
Podsumowując dotychczasowe rozważania, kondensator płaski okazał się trudny w precyzyjnym wykonaniu. Elastyczne materiały sprawiły, że charakterystyka odbiegała od liniowej. Geometria cylindryczna wykazuje większą sztywność oraz jego symetria ma znamiona samokorygujące względem odchyłek od osi symetrii obydwu okładek. Zewnętrzna okładka pełni rolę osłony przed warunkami zewnętrznymi. Udoskonalenie metody można uzyskać poprzez zwiększenie precyzji wykonania czujnika oraz dopracowanie metod pomiarowych i filtracji danych. Możliwym kierunkiem rozwoju jest stworzenie kondensatora płaskiego o wyrafinowanej geometrii okładek, na przykład wytrawiając część powłoki na płycie laminowanej w kształt drabinki/podziałki. Takie rozwiązanie nada charakter skokowy zmianie pojemności, a rozpatrując punkty charakterystyczne np. punkty przegięcia lub zbocza narastające, możliwe będzie precyzyjne okreś-



Rys. 13. Porównanie wyników dwóch pomiarów szybkiego napływu wody do tłoka



Rys. 14. Swobodny napływ do tłoka. (—) – pojemność kondensatora w funkcji czasu, (·) – zmiana pojemności w czasie

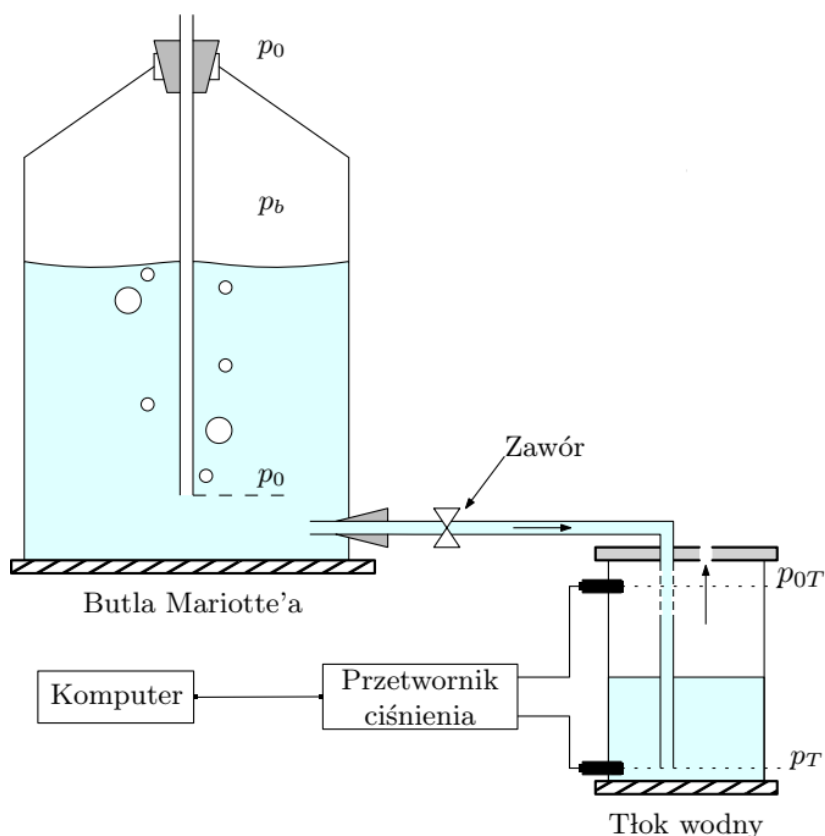


Rys. 15. Swobodny wypływ z tłoka. (—) – pojemność kondensatora w funkcji czasu, (·) – zmiana pojemności w czasie

lenie prędkości zmiany wysokości lustra wody. Wymiary i odległości między podziałkami powinny być dobrane w kontekście przewidywanej prędkości wypełniania tłoka. Znajomość odległości między kolejnymi drabinkami pozwoli na bezpośrednie przełożenie zmiany pojemności na przebytą drogę przez lustro wody. Pozwoliłoby to na pominięcie zagadnień związanych z otoczeniem takich jak przenikalność dielektryczna wody lub temperatura.

2.3. Pomiar poziomu cieczy z wykorzystaniem manometrów

Pomiar prędkości lustra wody można również zrealizować z wykorzystaniem dwóch manometrów (lub manometru różnicowego), mierzących ciśnienie na dnie tłoka oraz ciśnienie nad lustrem wody. Schemat układu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 16. Różnica ciśnień przelicza się wprost na wysokość lustra wody.



Rys. 16. Schemat układu pomiarowego z wykorzystaniem manometrów

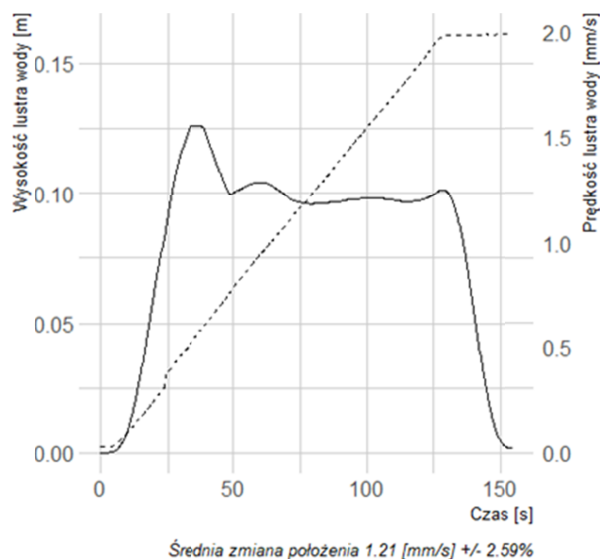
Pomiar strumienia objętości przy użyciu manometrów pozwala uzyskać dokładne wskazania prędkości przepływu. Manometr umieszczony nad lustrem wody daje poprawkę na nadciśnienie powstające w tłoku podczas wypychania powietrza. Ciśnienie wywierane na dolny manometr można opisać wzorem:

$$p_T = p_{0T} + \rho \cdot g \cdot h \quad (5)$$

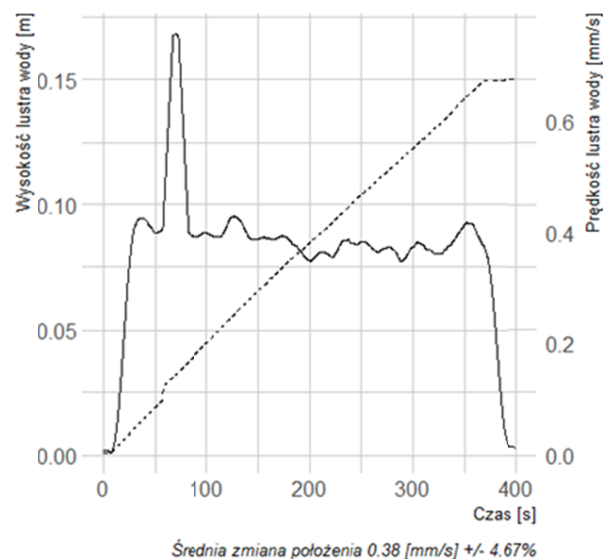
gdzie:

- p_{0T} – ciśnienie nad lustrem wody, [Pa],
- ρ – gęstość wody, [kg/m³],
- g – przyspieszenie ziemskie, [m/s²],
- h – wysokość słupa wody, [m].

Zakładając, że napięcie odczytywane z przetwornika ciśnienia jest liniową funkcją ciśnienia $f(p_T)$ można wyznaczyć zbiorczą stałą kalibracyjną zależną od parametrów ρ , g oraz współczynnika nachylenia funkcji $f(p_T)$. Pomiar napięcia z przetwornika zostały wykonane z wykorzystaniem karty pomiarowej *National Instruments NI-USB-6251*, który pozwalał na zbieranie bardzo dużej próbki danych. Rejestracja



Rys. 17. Swobodny napływ do tłoka (- -) – wysokość lustra wody, (–) – zmiana wysokości w czasie. Pomiar 1



Rys. 18. Swobodny napływ do tłoka (- -) – wysokość lustra wody, (–) – zmiana wysokości w czasie. Pomiar 2

danych została ustawiona na 5k próbek z częstotliwością 20 kHz, które następnie uśredniono. Ostatecznie uzyskano prędkość 4 punktów pomiarowych na sekundę. Dalsza filtracja sygnału pozwoliła na uzyskanie odszumionego i stałego sygnału. Wykonano dwa próbne pomiary dla maksymalnego otwarcia zaworu oraz dla wolnego wypływu wody. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 17 i 18.

Nagły skok widoczny na rysunku 17, spowodowany jest odpowietrzeniem układu. Całość reprezentuje liniowy wpływ wody z butli Mariotte'a. Po ustabilizowaniu się wypływu po ok. 75 sekundach uzyskano prędkość zmiany wysokości lustra wody na poziomie 1.21 ± 0.03 [mm/s]. Względne odchylenie standardowe wyniosło 2.59%. Dla wolnego wypływu przedstawionego na rysunku 18, po ustabilizowaniu się przepływu (ok. 100 s) uzyskano prędkość zmiany wysokości lustra wody na poziomie 0.38 ± 0.018 [mm/s]. Względne odchylenie standardowe wyniosło 4.67%.

3. Podsumowanie

Pomiar strumienia objętościowego jest kluczowy do oszacowania średniej prędkości w przekroju przestrzeni pomiarowej. Wykorzystanie wagi nieprzystosowanej do pomiarów dynamicznych umożliwia wyznaczenie średniego strumienia objętościowego w całkowitym czasie pracy układu. Zastosowanie czujników poziomu cieczy pozwala na wyznaczenie chwilowego strumienia objętościowego. Wykorzystanie pojemnościowego czujnika wysokości cieczy o geometrii cylindrycznej pozwala na osiągnięcie precyzji pomiaru w zakresie między 8% a 20%. Kalibracja takiego czujnika jest chwilowa. Zmiana przenikalności dielektrycznej cieczy oraz nierównomierna erozja okładek mocno wpływa na powtarzalność pomiarów i zaburza liniowy charakter czujnika. Pomiar zmiany wysokości lustra wody z wykorzystaniem manometrów w niewielkim stopniu jest zależny od naturalnych zmian składu wody. Dla szybkich wypływów niepewność względna wynosiła ok. 2.6%, co czyni tę metodę w zakresie szybkich prędkości stosunkowo precyzyjną. Dla wolniejszych wypływów uzyskano odchylenie ok. 4.7%. Zastosowanie manometrów wydaje się najlepszym rozwiązaniem, gdyż są one łatwe w montażu, niezależne od wymiarów tłoka, a dodatkowo nie wymagają umieszczenia w tłoku dodatkowej konstrukcji.

Praca została wykonana w roku 2021 w ramach prac statutowych realizowanych w Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Ardekani M.A.: *Hot-wire calibration using vortex shedding*. Meas. J. Int. Meas. Confed. **42**, 722-729, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2008.12.001>.

- [2] Sattarzadeh S.S., Kalpakli A., Örlü R.: *Hot-wire calibration at low velocities: Revisiting the vortex shedding method*. Adv. Mech. Eng. **2013**, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/241726>.
- [3] Bruun H.H., Farrar B., Watson I.: *A swinging arm calibration method for low velocity hot-wire probe calibration*. Experiments in Fluids **7**, 1989.
- [4] Rachalski A., Poleszczyk E., Zięba M.: *Use of the thermal wave method for measuring the flow velocity of air and carbon dioxide mixture*. Meas. J. Int. Meas. Confed. **95**, 210-215, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.019>.
- [5] Yue Z., Malmström T.G., Malmström M.: *A simple method for low-speed hot-wire anemometer calibration*. Meas. Sci. Technol. **9**, 1506, 1998.

Analysis of selected measurements methods of low fluid volume flow rate inflowing to water piston

Abstract

The generation of the controlled gas flow can be accomplished by means of a water piston. This technique is based on displacing the gas from the vessel by the flowing liquid. Determination of the average flow velocity of the gas thus produced may be accomplished by measuring the water volume flow inflowing into the tank. The paper presents three methods of measuring this quantity: Direct with the use of weight and indirect with the use of a capacitive water surface height sensor and a differential manometer for measuring the pressure in the water tank. Measurement with the use of weight was possible only for the limiting moments of the system operation time. The indirect, follow-up measurement with water level sensors enabled the determination of the instantaneous volumetric flow of water flowing to the piston.

Keywords: volumetric flow rate, very slow gas velocity, water piston