

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Sarny

pt.: „METODA POMIARU STRUMIENIA PRZEPLYWU PŁYNU W KANAŁACH PROSTOKĄTNYCH Z WYKORZYSTANIEM ŁUKÓW KOLAN”

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Sarny stanowi pismo nr M.00-520-204/2019 Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 7.10.2019r.

Praca zawiera 110 stron i podzielona jest na 7 rozdziałów poprzedzonych spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń, a zakończona bibliografią liczącą 72 pozycje literaturowe związane z tematem pracy, streszczeniem pracy w języku polskim i angielskim oraz dwoma załącznikami.

1. Omówienie pracy

Praca mgr inż. Piotra Sarny dotyczy opracowania i weryfikacji pośredniej metody pomiaru strumienia objętości przepływającego płynu przy wykorzystaniu przepływomierzy kolanowych w kanałach o przekrojach prostokątnych. Ze spisu literatury wynika, że Doktorant jest współautorem 8 prac cytowanych w rozprawie.

W rozdziale 1 omówiona została zasada pomiaru strumienia objętości (masy) przepływającego płynu wykorzystująca pomiar spadku ciśnienia. Przedstawione zostały przyrządy wykorzystujące spadek ciśnienia na elemencie spiętrzającym, do których należą kryza, zwężka Ventouriego, dysza oraz przepływomierz kolanowy. Podane zostały zależności służące do wyznaczania strumienia objętości za pomocą tych przyrządów. Wskazano również na problemy związane z pomiarem strumienia objętości za pomocą przepływomierza kolanowego oraz przedstawiono metodę pomiaru strumienia objętości tym przyrządem, w której wady te zostały wyeliminowane. Wadę tej metody jest konieczność częstego wzorcowania przyrządu wraz ze zmianą płynu jak i jego właściwości fizycznych. Metoda ta została opracowana w Zakładzie Mechaniki Płynów Politechniki Krakowskiej dla przepływów płynu w kanale o przekroju kołowym, a w obecnej pracy została uogólniona i zastosowana dla przepływów w kanałach o przekrojach prostokątnych.

W rozdziale 2 Doktorant podaje uzasadnienie wyboru tematyki badań oraz formułuje następującą tezę badawczą: „Zmierzona różnica ciśnienia płynu po obu stronach siecznej kolana o przekroju poprzecznym w kształcie prostokąta, zamontowanego na rurociągu o znanych wymiarach geometrycznych umożliwi z dobrą dokładnością wyznaczenie strumienia objętości przepływającego płynu. Podany jest również zakres prac badawczych, który obejmuje:

1. zbudowanie stanowiska badawczego,

2. opracowanie zależności empirycznej do wyznaczania strumienia przepływu,
3. modyfikację metody pomiaru pośredniego i opracowanie procedury obliczeniowej,
4. wykonanie obliczeń numerycznych badanych przepływów za pomocą wybranych modeli turbulencji,
5. weryfikację doświadczalną uzyskanych rezultatów za pomocą metody kryzowej,
6. wykonanie dodatkowych łuków kolan montowanych zamiennie na stanowisku badawczym.

Rozdział 3 zawiera opis stanowiska badawczego, zbudowanego przez Doktoranta oraz wyniki badań, które na nim przeprowadził. Pomiar spadku ciśnienia przepływającego płynu na tym stanowisku odbywa się dwiema metodami: za pomocą kryzy i przepływomierza kolanowego o przekroju prostokątnym dla zmieniających się wartości obrotów wentylatora. Wykonano pomiary różnicy ciśnienia w skrajnych punktach siecznej łuku kolana, różnicy ciśnienia na kryzie, lokalnej prędkości powietrza w punktach leżących na siecznej łuku kolana oraz w wybranych punktach leżących na osi przekroju poprzecznego rurociągu. Wyprowadzony został wzór do obliczania strumienia objętości płynu, uwzględniający kwadratowy przekrój poprzeczny kolana. Wzór ten został skorygowany przez współczynnik korekcyjny K . W dalszej części rozdziału opisana została procedura wyznaczania tego współczynnika na podstawie funkcji celu (3.12) oraz zmierzonych wartości strumienia objętości za pomocą kryzy i spadku ciśnienia w przekroju środkowym kolana. Na tej podstawie wyznaczone zostały charakterystyki przepływomierzy kolanowych dla różnych średnich promieni krzywizny kolana R_s i długości boku kwadratu przekroju kolana a . Wynika z nich zgodność charakterystyki przepływomierzy kolanowych z wartościami strumienia objętości uzyskanymi na podstawie pomiarów za pomocą kryzy. Rozdział kończy ocena niepewności pomiarowej mierzonego na stanowisku badawczym Doktoranta strumienia objętości przepływającego płynu za pomocą przepływomierza kolanowego.

Rozdział 4 rozpoczyna krótki wstęp, w którym Doktorant powołuje się na prace, których badania teoretyczne lub eksperymentalne dotyczyły zagadnień zbliżonych do Jego badań. Wyniki badań eksperymentalnych z pracy [59] posłużyły do weryfikacji obliczeń numerycznych prezentowanych w tym rozdziale. Autor przedstawia model matematyczny, którym posługuje się w obliczeniach numerycznych z użyciem pakietu FLUENT. Podaje modele turbulencji, których używał w obliczeniach. Są to model $k-\epsilon$, model $k-\omega$ SST oraz model RSM. Dużo miejsca poświęca opisowi tworzenia siatki objętości skończonych wraz z jej weryfikacją, przez podanie wartości współczynnika skośności elementów $< 0,5$ oraz parametru y^+ , którego wartość nie przekracza 5. Doktorant przedstawia i porównuje profile prędkości w wybranych przekrojach kanału, uzyskane dla różnych modeli turbulencji z wynikami eksperymentalnymi z pracy [59]. Na tej podstawie zostaje wybrany model turbulencji RSM, który najlepiej przybliżał profile prędkości w przekroju poprzecznym za łukiem kolana.

W rozdziale 5 porównane zostały wyniki obliczeń numerycznych z uzyskanymi przez Doktoranta wynikami badań eksperymentalnych. Porównano różnice ciśnień w wybranych punktach na powierzchni wewnętrznej ścianki łuku kolana R_w i zewnętrznej powierzchni ścianki łuku kolana R_z przepływomierza kolanowego, dla różnych wartości liczby Reynoldsa. Porównano wyznaczone numerycznie i eksperymentalnie charakterystyki przepływomierzy kolanowych dla różnych promieni krzywizny kolana R_s . Uzyskane zostały zbliżone wartości ciśnień oraz porównywalne charakterystyki przyrządu. Przeprowadzone badania pozwalają na

wykorzystanie obliczeń numerycznych do wyznaczania liczby Reynoldsa, potrzebnej do obliczenia strumienia objętości płynu.

Rozdział 6 zawiera wyniki badań z wykorzystaniem pomiaru różnicy ciśnień na powierzchni wewnętrznej ścianki łuku kolana R_w i zewnętrznej powierzchni ścianki łuku kolana R_z przepływomierza kolanowego do wyznaczania strumienia objętości płynu. Rozdział rozpoczyna się od opisu algorytmu wyznaczania strumienia objętości z podaniem kryterium jego zakończenia, kiedy przyrosty ciśnień zmierzonych za pomocą przepływomierza kolanowego i obliczonych numerycznie, będą się niewiele różnić. Algorytm wykorzystuje do obliczania liczby Reynoldsa w kolejnych krokach iteracji metodę siecznych. Zakończenie działania algorytmu oznacza, że znaleziona została liczba Reynoldsa i można obliczyć strumień objętości ze wzoru (6.4). W dalszej części rozdziału przedstawione zostały wyniki obliczeń otrzymanych opracowaną przez Doktoranta metodą pomiaru i porównane z obliczeniami na podstawie pomiarów za pomocą kryzy. Różnice wartości pomiędzy obu metodami wyznaczania strumienia objętości nie przekraczały 10%. Rozdział kończy ocena niepewności pomiarowej wyznaczania strumienia objętości płynu dla opracowanej przez Doktoranta metody.

Kończący pracę, rozdział siódmy stanowi podsumowanie wyników pracy oraz wnioski końcowe. Na szczególną uwagę zasługują oryginalne osiągnięcia Autora, do których można zaliczyć :

- zbudowanie stanowiska badawczego w celu sprawdzenia poprawności metody pomiaru strumienia przepływającego płynu za pomocą przepływomierza kolanowego o przekroju kwadratowym;
- wykonanie pomiarów spadku ciśnienia za pomocą kryzy i przepływomierza kolanowego i wykazanie, że oba sposoby pozwalają na wyznaczenie strumienia objętości przepływu płynu. Maksymalna różnica nie przekraczała 10%;
- weryfikacja obliczeń numerycznych za pomocą pakietu FLUENT dla danych eksperymentalnych, zaczerpniętych z literatury;
- opracowanie procedury obliczeniowej w języku C++, sprzęgniętej z pakietem FLUENT do wyznaczania liczby Reynoldsa;
- wykazanie, że metoda wyznaczania strumienia objętości płynu, opracowana przez Doktoranta, może korzystać z obliczeń numerycznych, w celu wyznaczenia liczby Reynoldsa.

Do wyznaczania liczby Reynoldsa w proponowanej przez Doktoranta metodzie użyty został FLUENT. Jest to skomplikowane narzędzie obliczeniowe o dużym potencjale, a przede wszystkim drogie. Istotą prowadzonych pomiarów jest uzyskanie informacji o strumieniu objętości w trakcie pomiarów, co biorąc pod uwagę pakiet FLUENT, nie wszędzie tak skonstruowany przyrząd pomiarowy znajdzie zastosowanie. Biorąc pod uwagę założenia, które zostały tutaj poczynione, tj stacjonarność przepływu jak również wykonywanie obliczeń numerycznych w 2D oraz prostą geometrię, można w kolejnym kroku doskonalenia tego przyrządu napisać Autorski program, który umożliwiłaby w czasie rzeczywistym, bez angażowania dużej mocy obliczeniowej i kosztownego oprogramowania uzyskać przyrząd pomiarowy mający szerokie zastosowanie do pomiaru strumienia objętości.

2. Uwagi

Str. 7.

We wzorach (1.1) i (1.2) wzięte są pod uwagę indeksy 1 i C, natomiast w tekście pracy i na rysunku 1.1 są to indeksy 1 i 2.

Str. 12.

Jeśli wzór (1.7) może być wykorzystany również dla kanałów prostokątnych, to powinna w nim występować średnica hydrauliczna, zamiast średnicy przekroju kołowego.

Str. 23.

Wyprowadzony został wzór (3.4). Jest to duże przybliżenie, które nie jest wyjaśnione w treści pracy. We wzorze (3.1) nie powinien się znaleźć promień R_s , ale promień r , którego koniec związany jest ze środkiem ciężkości rozważanego elementu płynu. Równanie (3.2) po uproszczeniu (3.1) ma postać

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho \frac{v^2}{r}$$

gdzie kierunek n pokrywa się ze zmianą promienia r , a v jest funkcją r . Wobec tego wzór (3.4) może być postaci

$$p_o - p_i = - \int_{R_w}^{R_z} \rho \frac{v^2}{r} dr = - \frac{\overline{\rho v^2}}{r} a$$

Z tego związku można otrzymać średnią wartość prędkości rozumianą jako

$$\bar{v} = \frac{1}{A} \int_A v dA$$

ale nie bezpośrednio z twierdzenia o wartości średniej, tylko jako:

$$p_o - p_i = - \frac{\overline{\rho v^2}}{r} a = - \frac{\overline{\rho v^2} R_s}{r \rho \bar{v} R_s} a \rho \bar{v}^2$$

Jeśli uwzględnimy współczynnik proporcjonalności K związany z pogrubioną częścią wzoru powyżej, to otrzymamy

$$\Delta p = p_i - p_o = \frac{1}{K^2} \frac{a}{R_s} \rho \bar{v}^2$$

Z tego wynika, że (3.5) nie opisuje teoretycznej zależności. Różnica ta jest tym większa im większa jest wartość a . Stąd współczynnik K jest wielkością, której wartość można ustalić na drodze doświadczalnej. Powyższa uwaga nie ma wpływu na wynik badań Doktoranta, ponieważ wzór (3.8) jest prawidłowy. Zastrzeżenia budzi tylko sposób w jaki go uzyskał.

We wzorze (3.4) zmiana ciśnienia powinna być różnicą ciśnienia pomiędzy wewnętrznym i zewnętrznym promieniem krzywizny kolana, a w pracy jest odwrotnie.

W pracy zmierzono i podano rozkłady prędkości w wybranych przekrojach, w tym w przekroju środkowym kolana. Nie wiadomo, w jakim celu zostały zmierzone. Czy na ich podstawie została wyznaczona średnia prędkość przepływającego płynu?

Ze wzoru (3.12) można w bezpośredni sposób wyznaczyć stałe A_1 i A_2 . Wystarczy obliczyć pochodne funkcji celu F względem A_1 i A_2 :

$$\frac{\partial F}{\partial A1} = 2 \left(\sum_{i=1}^m Q_{kryza}^{(i)} - S \left(A1 + \frac{A2}{\sqrt{Re_{kol}^{(i)}}} \right) \sqrt{\frac{R_s \Delta p^{(i)}}{a \rho^{(i)}}} \right) S \sqrt{\frac{R_s \Delta p^{(i)}}{a \rho^{(i)}}} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial A2} = 2 \left(\sum_{i=1}^m Q_{kryza}^{(i)} - S \left(A1 + \frac{A2}{\sqrt{Re_{kol}^{(i)}}} \right) \sqrt{\frac{R_s \Delta p^{(i)}}{a \rho^{(i)}}} \right) \frac{S}{\sqrt{Re_{kol}^{(i)}}} \sqrt{\frac{R_s \Delta p^{(i)}}{a \rho^{(i)}}} = 0$$

Stąd mamy układ równań liniowych dwóch zmiennych z dwoma niewiadomymi.

W rozdziale 4, dotyczącym obliczeń numerycznych brakuje informacji o procesie zbieżności obliczeń. FLUENT w trakcie obliczeń pokazuje jak ten proces przebiega dla poszczególnych równań, które są rozwiązywane. Jak przebiegała zbieżność procesu obliczeniowego?

Siatka opracowana przez Doktoranta jest bardzo ładnie skonstruowana, ale nie została wykorzystana symetria obszaru obliczeniowego w trakcie jej tworzenia. Z podanych w pracy informacji wynika, że warunki brzegowe uwzględniane w obliczeniach nie zaburzały tej symetrii. Wykorzystanie tego faktu pozwoliłoby zmniejszyć o połowę liczbę węzłów oraz liczbę objętości kontrolnych, przez co zmniejszyłaby się liczba rozwiązywanych równań różniczkowych. Brak zastosowanej symetrii obszaru obliczeniowego powoduje asymetrię rozwiązania, widoczną na rys. 4.10.

Str. 73.

Autor pisze: „Odpowiednie wartości liczby $Re_{col}^{(exp)}$ wyznaczono również ze wzoru (3.17) na podstawie pomiaru strumienia objętości za pomocą kryzy pomiarowej.” Przed wszystkim to kryza mierzy spadek ciśnienia, na podstawie którego można wyznaczyć strumień objętości, a ponadto to tej liczby Reynoldsa nie wyznacza się ze wzoru (3.17), bo on służy do wyznaczenia strumienia objętości dla pomiaru spadku ciśnienia za pomocą kryzy.

Str. 74.

Na rysunkach 5.2 – 5.5. występuje niezgodność oznaczeń z tekstem. Z tekstu nad rysunkiem 5.2 wynika, że linią ciągłą oznaczone są wyniki obliczeń numerycznych odnoszące się do krawędzi wewnętrznej ścianki łuku kolana R_w , a linią przerywaną wyniki otrzymane dla krawędzi zewnętrznej ścianki łuku kolana R_z . Na tych rysunków tak nie jest zaznaczone.

Str. 83.

Wzór (6.4) jest prawdziwy dla przekroju kołowego. Prawidłowy wzór powinien być postaci

$$Q = Av = a^2v = a\nu Re$$

Str. 89.

Doktorant pisze: „...przypadek kanału z łukiem kolana o przekroju prostokątnym jest znacznie prostszy od analizowanego o przekroju kwadratowym”. Z czego to wynika, w tekście nie znalazłem takiej analizy.

W podsumowaniu Autor pisze, że w obliczeniach numerycznych dla kanałów o przekroju prostokątnym można wykorzystać modele dwuwymiarowe. Szkoda, że Doktorant nie przedstawił takich obliczeń, które pozwalałyby ocenić, czy za ich pomocą można uzyskać wystarczającą dokładność obliczeń, potrzebną do wyznaczania strumienia objętości.

Str. 90.

Autor stwierdza: "Wysoką dokładność pomiaru umożliwia między innymi opracowany, realistyczny model matematyczny...". Na czym polega opracowanie tego modelu przez Doktoranta? W mojej ocenie jest to układ równań rozwiązywany we FLUEN-cie?

Str. 91.

Autor pisze: „Wymieniona, maksymalna względna wartość odchylenia wyników pomiaru obserwowana była w przypadku minimalnych strumieni...” Z analizy wyników zawartych w tabelach 6.1 – 6.3 wynika, że to stwierdzenie prawdziwe jest tylko dla wyników z pierwszej tabeli.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie zmniejszają merytorycznej wartości pracy.

3. Podsumowanie

Praca mgr inż. Piotra Sarny potwierdziła słuszność postawionej przez niego tezy. Cele szczegółowe jakie postawił sobie dla potwierdzenia tezy, zostały przez niego w pełni zrealizowane i stanowią jego oryginalne osiągnięcie.

Doktorant wykazał się umiejętnościami prowadzenia i weryfikacji badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych, co jest bardzo cennym połączeniem w pracy naukowej. Zbudował stanowisko badawcze i wykonał na nim badania. Badania prowadzone były z należytą starannością, o czym świadczy zarówno różnorodna ich weryfikacja (eksperymentalna i numeryczna), jak również ocena niepewności pomiarowej przy wyznaczaniu strumienia objętości płynu.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Sarny spełnia wymogi Ustawy o Stopniach i tytule Naukowym i mieści się w dyscyplinie mechanika. Wnoszę zatem do Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Andrzej Pochwała