

dr hab. inż. Marian Banaś

prof. nadzw. AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska

Kraków, dn. 6 listopada 2019

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgra inż. Piotra Sarny**

**p.t. „Metoda pomiaru strumienia przepływu płynu w kanałach prostokątnych  
z wykorzystaniem łuków kolan”**

**promotorstwa prof. dra hab. inż. Kazimierza Rupa**

#### **Podstawa opracowania**

Recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej – Pana prof. dra hab. inż. Jerzego Śładka, zawarte w piśmie z dn. 7.10.2019.

#### **Charakterystyka ogólna rozprawy**

Recenzowany tekst ma formę rozprawy A4, składającej się ze 110 stron tekstu (wraz z załącznikami). Tekst jest podzielony na 7 ponumerowanych rozdziałów, które można podzielić na trzy grupy: część formalną (rozd. 2 – „Cel, zakres pracy i teza” oraz „Streszczenie” i „Summary”), część teoretyczno-przeglądową (rozdziały 1 i 4.1) oraz część praktyczną (rozdziały 3–7). W osobnym rozdziale początkowym autor zamieścił wykaz stosowanych w pracy skrótów i oznaczeń. W jednym z końcowych rozdziałów zamieścił również spis wykorzystywanego w pracy piśmiennictwa zawierający 72 pozycje literaturowe. Warto zwrócić uwagę, że jest to w dużej części angielskojęzyczna literatura przedmiotowa z ostatnich kilkunastu lat, a ponadto 8 z tych pozycji jest współautorstwa doktoranta i są to w większości pozycje z listy JCR. Ponadto do pracy dołączono dwa załączniki: plik zawierający kod wykorzystywanego przez doktoranta programu minimalizacyjnego, współpracującego z zewnętrznym pakietem Fluent, oraz treść pliku „journal” – pliku zadań dla solvera numerycznego – wspomnianego programu Fluent.

## **Dobór tematyki rozprawy**

Pomiary wielkości strumienia przepływających w instalacjach płynów są powszechnie stosowane w różnych procesach w praktyce laboratoryjnej i przemysłowej, w gospodarce, a nawet życiu codziennym. Spośród różnych metod pomiaru strumienia, metody piętrzące ze względu na stabilność, wiarygodność i powszechność fizycznej metody pomiaru są chętnie wykorzystywane. Zwłaszcza krzywaki (kolana) są bardzo atrakcyjne, gdyż w przeciwieństwie do zwęzek lub kryz pomiarowych nie wnoszą dodatkowych strat ciśnienia przepływającego płynu – rozmaite zmiany kierunku w rurociągach płynów i tak z powodów konstrukcyjnych występują powszechnie. Wprawdzie różnice ciśnień jakie są mierzone w przepływomierzach kolanowych, zwłaszcza w przypadku gazów są względnie małe, ale nie stanowi to obecnie ograniczenia dla współczesnych czujników ciśnienia i stosowanych technik pomiarowych. Pomimo tych zalet nie wszystkie zjawiska fizyczne występujące podczas przepływu płynów przez kolana pomiarowe są w pełni rozpoznane, zwłaszcza w przypadkach bardziej skomplikowanych geometrii niż kołowe symetryczne, a ich dokładny opis fizyczny wymaga użycia formuł matematycznych najczęściej nie posiadających prostych rozwiązań analitycznych. Intensywny rozwój numerycznych metod obliczeniowych pozwala jednak na skuteczne modelowanie przepływów zarówno w szerokim zakresie prędkości, właściwości fizycznych płynów, jak i dla bardziej skomplikowanej geometrii kanału pomiarowego. Niesie to nadzieję na lepsze rozpoznanie charakteru zjawisk zachodzących w takich przepływomierzach ale również na doskonalenie konstrukcji i metod analitycznych dla przeprowadzenia łatwiejszego, mniej długotrwałego i bardziej dokładnego procesu pomiarowego niż w urządzeniach klasycznych.

Wobec zasygnalizowanych problemów tematykę rozprawy uważam za ważną, wychodzącą naprzeciw rozwojowi współczesnych technik obliczeniowych i pomiarowych oraz wymagającą szerszej analizy teoretycznej oraz badań eksperymentalnych.

## **Cele, teza i zakres pracy**

Głównym, założonym przez autora celem pracy było rozszerzenie opracowanej w Zakładzie Mechaniki Płynów PK metody pomiaru strumienia płynu z użyciem kolan pomiarowych na przypadki kanałów o przekroju prostokąta. Dodatkowym zaś celem pracy było opracowanie zmodyfikowanej metody pomiaru strumienia płynu, której zasadniczą częścią jest numeryczna minimalizacja (z założoną dokładnością) różnic pomiędzy wartością ciśnienia różnicowego zmierzonego eksperymentalnie na przeciwległych stronach siecznej kolana po-

miarowego, a odpowiadającą jej wartością wyliczoną numerycznie z użyciem metody objętości skończonych.

Realizacja tych celów miała służyć udowodnieniu tezy, że: *„zmierzona różnica ciśnień po obu stronach siecznej kolana pomiarowego o przekroju poprzecznym w kształcie prostokąta zamontowanego na rurociągu o znanych wymiarach geometrycznych umożliwia z dobrą dokładnością wyznaczenie strumienia objętości przepływającego płynu”*.

Osiągnięcie tych celów i udowodnienie tak postawionej tezy autor osiągnął poprzez realizację szerokiego zakresu pracy, obejmującego zarówno budowę stanowiska pomiarowego pozwalającego na badania przepływu powietrza nawet dla  $Re$  do 200000, wyznaczenie charakterystyk  $Q(\Delta p)$ , wykonanie obliczeń numerycznych profili przepływu płynu przez kolano pomiarowe (dla kilku modeli turbulencji), opracowanie metody pomiaru pośredniego strumienia z wykorzystaniem optymalizacyjnych metod numerycznych a także weryfikację doświadczalną otrzymanych wyników metodami pomiarów klasycznych (m. kryzową).

### **Szczegółowa treść i zakres rozprawy**

W rozdziale 1, autor zawarł wprowadzenie teoretyczne w problematykę pracy, ze szczególnym uwzględnieniem zasad działania oraz problemów budowy i użytkowania przepływomierzy piętrzących, a zwłaszcza przepływomierzy kryzowych, zwężkowych i kolanowych. Przeprowadził analizę literatury w zakresie pomiarów strumienia z użyciem kolan pomiarowych, analizując występujące w nich zjawiska przepływowe, szczególnie te w kolanach o przekrojach prostokątnych i kwadratowych.

W rozdziale 2 autor przedstawił budowę zaproponowanego przez siebie stanowiska pomiarowego z wymiennymi trzema kolanami o średnich promieniach gięcia (120,1; 161,1 oraz 241,5 mm) i przekroju prostokątnym o wymiarach 80×80 mm. Stanowisko zostało wyposażone w zdublowany pomiar różnicy ciśnienia (kryza pomiarowa oraz kolano pomiarowe), a także możliwość wyznaczenia profili prędkości wzdłużnej przepływającego płynu w kilkunastu charakterystycznych punktach konstrukcyjnych kolan pomiarowych oraz pomiar temperatury przepływającego powietrza. Przepływ wymuszany jest przez wysokowydajny wentylator promieniowy pozwalający na uzyskanie w kolanach pomiarowych (o przekroju 80×80 mm) przepływów z  $Re$  w zakresie 5000÷200000.

W rozdziale 3 zostały przedstawione wyniki pomiarów strumienia na zbudowanym stanowisku pomiarowym zarówno uzyskane z użyciem kryzy pomiarowej, jak i metodą klasyczną na kolanach pomiarowych, czyli poprzez wyznaczenie charakterystyk pomiarowych  $Q(\Delta p)$ . Autor przedstawił również wyznaczone z użyciem sondy termoanemometrycznej pro-

file prędkości w wybranych przekrojach kolan pomiarowych ( $45^\circ$ , w odl.  $2d$  oraz  $5d$ ). Pomierzone spadki ciśnienia posłużyły mu następnie na wyznaczenie współczynników w empirycznej formule  $Q = f(\Delta p)$  (z wykorzystaniem iteracyjnej metody minimalizacyjnej Nelder-Meada) dla badanych kolan pomiarowych o trzech różnych promieniach łuku – metoda klasyczna. W rozdziale autor przedstawił również szacunek błędów wyznaczenia wartości strumienia z użyciem metody klasycznej.

W rozdziale 4 doktorant przedstawił obliczenia numeryczne przepływu powietrza (o określonych parametrach: temperaturze i gęstości) przez kanały o różnych kształtach (i określonych wymiarach) wykorzystując procedurę objętości skończonych z założonymi 4 modelami turbulencji: standardowy model  $k-\epsilon$ , S-A (model Spalart-Almaras), SST  $k-\omega$  oraz RSM (Reynolds Stress Model). Przedstawił obszernie wyniki symulacji profili rozkładu prędkości powietrza zarówno dla przykładowych danych literaturowych, jak i zmierzonych danych eksperymentalnych, uzyskując zadowalający stopień zgodności.

W rozdziale 6 autor zaproponował zmodyfikowaną procedurę wyznaczania wartości strumienia przepływającego przez kolano pomiarowe płynu, w którym wartość strumienia określana jest w procedurze optymalizacji funkcji różnicy pomiędzy zmierzonym ciśnieniem różnicowym na kolanie pomiarowym, a obliczoną wartością z użyciem numerycznych symulacji dla warunków przepływu określonych parametrami fizycznymi płynu (gęstość i temperatura), ściśle określonej geometrii kolana pomiarowego. Dla praktycznej realizacji tejże proponowanej procedury autor posłużył się specjalnie do tego celu napisanym programem (w C++Builder), który realizuje minimalizację wspomnianej funkcji, a do obliczeń numerycznych wykorzystuje zewnętrzny solver (Fluent 6.2). Z użyciem tego właśnie narzędzia wykonał obliczenia wartości strumienia z wyników eksperymentu z założoną niepewnością pomiarową. W tymże rozdziale autor zawarł również dyskusję i wyznaczenie błędów pomiarowych w proponowanej metodzie obliczeniowej.

W rozdziale 7 autor zrekapitulował wyniki prac prowadzonych w trakcie realizacji swojej pracy doktorskiej, a na ich podstawie zaproponował syntetyczne wnioski.

Porównanie wyników eksperymentu opracowanych metoda klasyczną i zaproponowaną, zmodyfikowaną metodą pomiarowo-numeryczną pozwoliło na stwierdzenie, że wyniki te są zbieżne. Tym samym autor dowiódł założonej tezy, że jest możliwe określanie strumienia płynu przepływającego przez kolano pomiarowe na podstawie znajomości różnicy ciśnienia różnicowego po przeciwnych stronach jego siecznej oraz jego geometrii i właściwości fizycznych płynu. Rozważania teoretyczne oraz badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na kolanach o geometrii prostokątnej – autor osiągnął więc obydwa założone cele.

## Walory pracy i osiągnięcia autora

Z ważniejszych osiągnięć autora warto wskazać:

- Zbudowanie stanowiska pomiarowego do badania przepływu powietrza przez kanał kolana pomiarowego o przekroju prostokątnym  $80 \times 80$  mm. Stanowisko posiada 3 wymienne kolana o różnych średnich promieniach łuku. Stanowisko pozwala na wyznaczenie profili prędkości przepływającego płynu w kilku płaszczyznach przekroju kolana, z użyciem termoanemometru ale też innymi przyrządami pomiarowymi.
- Wykonanie szerokiego zbioru badań dla kilku kolan pomiarowych w postaci rozkładu ciśnień w ich charakterystycznych punktach konstrukcyjnych, ale również wyznaczenie zbioru profili prędkości w ich kilku przekrojach poprzecznych.
- Wyznaczenie charakterystyk pomiarowych dla użytych 3 różnych kolan pomiarowych oraz określenie empirycznych formuł na wartość strumienia przepływającego przez nie powietrza z użyciem kryzy pomiarowej jako przepływomierza referencyjnego.
- Zbudowanie modeli numerycznych do obliczeń przepływu płynu przez kolano pomiarowe. Przygotowanie zoptymalizowanej siatki objętości skończonych dla fizycznej geometrii wykorzystywanych kolan pomiarowych, W obliczeniach wykorzystano kilka różnych modeli turbulencji, a uzyskiwane wyniki zwalidowano zarówno danymi literaturowymi (dostępnymi dla szerokiej społeczności naukowej) jak i zmierzonymi danymi eksperymentalnymi, uzyskując zbieżność.
- Opracowanie nowej metody określania strumienia przepływającego płynu przez kolana o przekroju prostokątnym. Metoda ta nie wymaga wyznaczania charakterystyk kolan pomiarowych i kalibrowania z użyciem np. kryzy lub zwężki pomiarowej. Istotą tej metody jest minimalizacja różnicy pomiędzy różnicowym ciśnieniem zmierzonym po przeciwnych stronach siecznej kolana pomiarowego, a takimże ciśnieniem wyznaczonym z symulacji numerycznych przy znanych wymiarach geometrycznych elementu pomiarowego oraz właściwościach fizycznych przepływającego płynu.
- Opracowanie autorskiego programu do realizacji wspomnianej zmodyfikowanej pomiarowo-numerycznej metody wyznaczania strumienia przepływającego przez kolano pomiarowe. Program napisany w C++ wykorzystuje metodę siecznych. Numeryczne rozwiązywanie równań bilansowych i pędu płynu jest realizowane przez zewnętrzny solver iteracyjnie uruchamiany z programu minimalizacyjnego. Program pozwala w wygodny sposób sterować parametrami obliczeniowymi jak: parametry fizyczne płynu, założona dokładność etc...

## Uwagi krytyczne

Praca jest przygotowana prawidłowo, cel i teza pracy są jasne, tok prac zmierzających do ich udowodnienia są czytelne i prawidłowe, jednakże w trakcie szczegółowej lektury rozprawy można znaleźć elementy mogące wymagać dodatkowego wyjaśnienia lub dyskusji i dlatego kilka wynikających z tego uwag chciałbym poniżej skrótowo wymienić i omówić.

- Podane w tabelach 3.2, 3.3, 3.7–3.9 i 3.13 ciśnienia zmierzone z użyciem mikroanemometru Askania i miernika ciśnienia ALMEMO we wszystkich pomiarach mają jednakową wartość (poza tabelą 3.13, gdzie wskazania z mikromanometru Askania podano w mmH<sub>2</sub>O, a w innych w Pa). Jak autor kilkakrotnie podkreśla (s. 71 w1d i s. 76 w10d) – użyty mikromanometr Askania cechował się wysokim stopniem dokładności, to czy wartości nim zmierzone i czujnikiem ALMEMO rzeczywiście się nie różniły? Po co podawano więc obydwie identyczne wartości?
- W jaki sposób wyznaczano wartości  $Re$  na wykresach 3.4–3.8. Czy do ich wyznaczenia użyto średniej arytmetycznej zmierzonych prędkości?
- Dlaczego w tabelach 3.14–3.19 wartość strumienia  $Q$  podano z dokładnością do 1 cm<sup>3</sup>/s (10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s), a różnicę strumieni (kryza-kolano) do 10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/s. Opis ostatniej (8.) kolumny tych tabel  $\Delta Q$  sugeruje, że jest to różnica wartości strumieni, a nie jak na s. 38 opisano odchyłka względna.
- W rozdz. 3.4 autor przedstawił szacunek niepewności wyznaczenia mierzonej wartości strumienia metodą klasyczną. Wskazał potrzebę podania niepewności wielkości  $K$ ,  $a$ ,  $R_s$ ,  $\Delta p$  i  $\rho$ . Jak autor oszacuje niepewność wielkości  $K$ ? (wsp. przepływu).
- W tabelach 3.4 i 3.5 przedstawiono 10 punktów pomiarowych skł. wzdłużnych prędkości (dla różnych głębokości sondowania kanału), w tabeli 3.6 było ich 9, podczas gdy na wykresach 3.5–3.6 przedstawiających profile prędkości na podstawie wartości z tych tabel punktów pomiarowych jest 10. Skąd zatem w serii 5d (dane z tabeli 3.6) 10-ty punkt pomiarowy (dla głęb. sond.  $y_6 = y + 15 = 60\text{mm}$ ) na wykresach 3.4–3.6? Podobnie w tabeli 3.10 jest 9 punktów pomiarowych a w 3.11 i 3.12 po 8. Skąd zatem na wykresach 3.7–3.8 dla serii 2d i 5d jest 9 punktów pomiarowych?
- Dlaczego na wykresach 3.7 i 3.8 podano profile prędkości dla obrotów wentylatora odpowiednio: 50% i 80%, a nie przedstawiono wykresu z profilem dla obrotów 65%?
- Jak obliczono wartości prędkości w profilach prędkości na wykresach 3.5–3.8 zaznaczone liniami ciągłymi? Jak autor wytłumaczy fakt, że ich przebieg tak bardzo odbiega od zaznaczonych danych pomiarowych?

- Na s. 55 w2d autor pisze, iż „przepływy turbulentne wykazują szybkozmienne fluktuacje ciśnienia, objętości i temperatury”. Czy potencjalne fluktuacje temperatury mają znaczenie przy rozważaniu takich przepływów?
- Na s. 72 w3g autor pisze, że zamieszczony w tabelach 5.1–5.3b wartości ciśnień zmierzonych i obliczonych numerycznie wykazują „dobry” stopień zgodności. Jakie jest ilościowe kryterium stopienia zgodności. Czy dla wszystkich danych z tabeli 5.1 uprawnione jest wcześniejsze stwierdzenie o „dobrej” zgodności?
- Dlaczego w tab. 5.2 i 5.3 dla przedstawionych ciśnień  $\Delta p_{oi}$  nie pokazano różnic pomiędzy wartościami zmierzonymi, a obliczonymi?
- Na rysunku 5.7 w legendzie wykresu wyszczególniono dwie serie z obliczeń numerycznych, a na wykresie jest zaznaczona tylko jedna – czy wartości z serii są tak zbliżone, że nakładają się na siebie?
- Na s. 82 w8g autor napisał, że podczas pomiarów „warunki przepływu ustalonego osiągnęto w czasie kilkunastu sekund” – jakie był pomiarowe kryterium osiągnięcia tych warunków – ilościowe czy tylko jakościowe?
- Na wszystkich wykresach autor konsekwentnie osie opisał tylko symbolicznie. Może warto byłoby, aby dodać opis słowny, bo np. oznaczenie „z/Dh” na wyk. 5.2–5.5 nie jest opisane w tekście, ani w spisie oznaczeń.
- Czy model numeryczny, który autor zbudował i zwalidował dla przebadanego eksperymentalnie kolana pomiarowego będzie dawał poprawne wyniki również dla innych fizycznych kolan pomiarowych? Czy wpływ parametrów konstrukcyjnych typu różne wykonanie szwów lub spawów, chropowatości wewnętrznej powierzchni kolan czy nawet obecności osadzających się osadów w różnych modelach a nawet egzemplarzach kolan prostokątnych można w tym modelu pominąć?

Można w tekście znaleźć pewne niedoskonałości edycyjne (wyrazy z pisownią łączną lub rozłączną albo literówki, czy inne) – te zaznaczyłem i przekazałem autorowi rozprawy.

Podane uwagi w dużej części posiadają charakter dyskusyjny i nie mają na celu jakiegokolwiek deprecjonowania pracy, którą oceniam pozytywnie. Ich wskazanie miało na celu podniesienie dyskusji nad wybranymi elementami pracy i sposobu interpretowania wyników, a także pomóc w doskonaleniu warsztatu i może być ewentualnie przydatne w dalszej pracy badawczej i naukowej autora, przy pisaniu i redagowaniu tekstów artykułów, monografii etc...

## Ocena pracy i wnioski końcowe

Autor postawił przed sobą ambitny cel naukowy znacznego uproszczenia pomiarów strumienia płynu przepływającego przez kolana o przekroju prostokątnym, z wykorzystaniem obliczeń i symulacji numerycznych. Miało to nie tylko uprościć procedurę pomiarową, pozwolić na rezygnację z wyznaczania eksperymentalnych charakterystyk każdego z kolan pomiarowych, który to proces jest żmudny i obciążony błędami, ale dzięki wykorzystaniu nowoczesnych technik informatycznych, zautomatyzować proces pomiaru. Założone cele udało się autorowi zrealizować i potwierdzić postawioną tezę, iż do wyznaczenia strumienia przepływu płynu w kolanach pomiarowych o przekroju prostokątnym wystarczającymi informacjami jest różnica ciśnień pomiędzy oboma końcami siecznej kolana, dokładne wymiary geometryczne strefy pomiaru i właściwości fizyczne płynu (lepkość i gęstość).

Lektura pracy pozwala na stwierdzenie, że autor dobrze znając mechanikę płynów oraz metody obliczeń numerycznych potrafi je skutecznie wykorzystać do rozważanych przez siebie praktycznych problemów pomiarowych. Dla zbadania możliwości pomiaru strumienia z użyciem kolan o przekroju prostokątnym, zbudował stanowisko pomiarowe o szerokim zakresie uzyskiwanych wartości  $Re$ , wykonał dużą liczbę eksperymentów, zbudował modele numeryczne do obliczeń profili przepływów z użyciem różnych modeli turbulencji i na tej podstawie zaproponował metodę modyfikacji klasycznego sposobu pomiaru strumienia wykorzystującą obliczenia numeryczne. Zaproponowana metoda daje zbieżne wyniki z metodą klasyczną, pozwalając na uzyskanie znacznie szybciej i przy mniejszych nakładach pracy wyników o zadowalającej dokładności. Częstkowe wyniki swoich badań autor publikował w literaturze przedmiotowej – w wykazie literatury jest 8 pozycji jego współautorstwa.

Można zatem stwierdzić, że jest doświadczonym badaczem potrafiącym postawiony praktyczny problem badawczy skutecznie rozwiązać: zaplanować tok prac, zaprojektować i wykonać stanowisko badawcze, dokonać pomiarów i przetworzyć uzyskane wyniki, w razie potrzeby proponując modyfikacje pierwotnych metod analizy wyników. Potrafi łączyć eksperymentalne badania laboratoryjne z badaniami wykorzystującymi numeryczne metody obliczeniowe. Dowiódł więc swojej dojrzałości jako eksperymentator i naukowiec.

Biorąc pod uwagę powyżej przedstawione fakty, pragnę wyrazić swoje przekonanie, że praca ta spełnia wymagania ustawy z dn. 14 marca 2003 „o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” wraz z późn. zm. w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i stawiam wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie autora do publicznej obrony.

*Adam Bernik*