

Prof. dr hab. inż. Witold ELSNER
Katedra Maszyn Ciepłych
Politechnika Częstochowska
ul. Armii Krajowej 21; 42-201 Częstochowa
tel.: (034) 3250507; e-mail: witold.elsner@pcz.pl

Częstochowa, 31.01.2025

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Heronimeczaka:

„Badanie właściwości metrologicznych kryzy segmentowej skośnej”

Recenzja została opracowana na zlecenie Rektora Politechniki Opolskiej dr hab. inż. Marcina Lorenca w piśmie RR/1256/2024 z dnia 14 listopada 2024 r. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska przygotowana została pod kierunkiem dr hab. inż. Mariusza Rząsy, prof. Politechniki Opolskiej oraz dr inż. Andrzeja Mrowca prof. Uniwersytetu Kaliskiego, który występuje jako promotor pomocniczy. Praca została napisana w języku polskim, zawiera 184 strony i jest podzielona na osiem rozdziałów. Na początku pracy zamieszczono wykaz oznaczeń a na końcu spis pozycji literaturowych związanych z tematyką rozprawy.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy.

Tematyka rozprawy dotyczy rozwoju metod pomiarowych stosowanych w określaniu strumienia objętości, względnie masy płynu lub mieszanin wielofazowych. Tego typu pomiar, mający zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, jak również w badaniach laboratoryjnych, realizuje się za pomocą tzw. przepływomierzy. W zależności od budowy, rodzaju mierzzonego medium, wymaganej dokładności oraz warunków pracy wyróżnia się kilka grup przepływomierzy, w tym ultradźwiękowe, elektromagnetyczne, mechaniczne, wirnikowe itd. Doktorant w rozprawie postanowił się zająć jednym z najstarszych systemów pomiarowych tj. przepływomierzem spiętrzającym. Głównym obiektem Jego zainteresowań jest kryza segmentowa, która może być wykorzystywana do pomiar przepływu cieczy zanieczyszczonych ciałami stałymi tworzącymi zawiesiny. Jego prosta budowa, brak elementów ruchomych, duża niezawodność i łatwość montażu powoduje, że wciąż znajduje on szerokie zastosowanie. Problem badawczy, który doktorant usiłuje rozwiązać jest analiza, jak geometria kryzy segmentowej, jej nachylenie i pole przekroju (ew. wykończenie krawędzi) wpływa na proces gromadzenia się zanieczyszczeń w przewężeniu oraz na dokładność pomiarową. W pracy zastosowano zarówno metody numeryczne jak i badania eksperymentalne. Powszechność zastosowania przepływomierzy w przemyśle oraz nie do końca poznane zjawiska występujące w tych prostych konstrukcyjnie układach pomiarowych, wskazuje że prace zmierzające do poprawy ich dokładności pomiarowej, poprzez przeprowadzenie systematycznej analizy parametrycznej, są z pewnością celowe. Tytuł rozprawy jest dobrze dobrany i właściwie oddaje jej treść. Praca zawiera elementy poznawcze, lecz jej podstawową zaletą są efekty aplikacyjne.

Z formalnego punktu widzenia i obecnej klasyfikacji dyscyplin naukowych rozprawa, sytuuje się dyscyplinie **inżynieria mechaniczna**.

2. Ocena szczegółowa.

Po krótkim wstępie poświęconym, szerokiemu wykorzystaniu technologii pomiarowej do monitorowania masowego przepływu cieczy w przemyśle, Doktorant zamieszcza w **rozdziale 1** przegląd przepływomierzy charakteryzując podstawowe cechy poszczególnych urządzeń pomiarowych. Następnie definiuje On problem badawczy, jakim jest pomiar strumienia cieczy zanieczyszczonej mieszaniną cząstek stałych w rurociągu poziomym, wskazując jednocześnie na ograniczenia stosowanej kryzy segmentowej, gdzie jednym z nich jest zaleganie cząsteczek stałych, o gęstości większej od przepływającej cieczy, w górnej części rurociągu, przed kryzą. Rozwiązanie tego problemu Doktorant upatruje we wprowadzeniu pochylecia kryzy pod pewnym kątem, dzięki czemu podczas przepływu zanieczyszczonej cieczy będzie dochodziło do tzw. samooczyszczania przepływomierza. W tym kontekście Doktorant próbował sformułować hipotezę badawczą. Moim zdaniem nie została ona sformułowana właściwie. Hipoteza badawcza to pozytywne stwierdzenie dotyczące problemu czy zjawiska, które w ramach badań chcemy potwierdzić. W analizowanym przypadku jest to raczej pytanie badawcze.

W uzupełnieniu Doktorant zaproponował dwa cele pracy tj. opracowanie opisu matematycznego przepływomierza z kryzą segmentową skośną i określenie, dla sprecyzowanych wymagań na wlocie, parametrów przepływu cieczy i kąta nachylenia kryzy oraz opisanie równaniem empirycznym współczynnika przepływu C . Uważam, że tak sformułowane cele pracy są zbyt wąsko nakreślone i nie wyczerpują zakresu naukowego i poznawczego rozprawy. Według Ustawy (Dz.U. 2017 poz. 1789 późn. zm.) rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, względnie oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań w sferze gospodarczej. Cel rozprawy powinien być, moim zdaniem, sformułowany w taki sposób aby wskazać jaki problem naukowy będzie rozwiązany. Najczęściej się również oczekuje, że cel jest sformułowany w oparciu o krytyczny przegląd literatury, który powinien, przy okazji, wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną kandydata w dyscyplinie naukowej.

W **rozdziale 2**, na wstępie, zamieszczono, w większości podręcznikowe, informacje dotyczące mechaniki płynów, wybranych liczb kryterialnych, które mogłyby być pominięta bez szkody dla całej rozprawy. Zamieszczenie definicji współczynnika przepływu C dla kryzy segmentowej, opisu źródeł strat ciśnienia oraz analizę lokalizacji punktów poboru ciśnienia oceniam natomiast pozytywnie. Jak stwierdziłem powyżej w tym rozdziale brakuje przeglądu literatury dotyczącego badań tej grupy przepływomierzy. Informacje zamieszczone w rozdziale 1 i 2, nie wyczerpują tego celu i mają raczej praktyczne znaczenia.

Następnie w **rozdziale 3** dotyczącym mechanizmu samooczyszczania kryzy segmentowej przeanalizowano bilans sił dla pojedynczej cząsteczki ciała stałego zanurzonej w płynie, w

obecności kryzy prostopadłej do kierunku przepływu oraz kryzy pochylonej. Wyznaczono lokalną prędkość graniczną cieczy która spełnia warunek równowagi bilansu sił oraz zdefiniowano współczynnik porównawczy $\psi_{\gamma=n^\circ}$ będący stosunkiem zmiany wielkości obszaru „magazynowania” cząstek przed kryzą segmentową skośną względem obszaru dla kryzy prostopadłej.

Rozdział 4 zatytułowany „Metodologia” podzielono na dwie części, pierwszą dotyczącą zastosowanych metod numerycznych oraz drugą opisującą metody doświadczalne. Obliczenia numeryczne dla obiektu (fragment rurociągu z umieszczoną skośnię, lub prosto kryzą) przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Ansys Fluent. Proces budowy geometrii 3D, siatki obliczeniowej, czy przyjęcie warunków brzegowych jest co do zasady poprawny i właściwy dla tego typu zadań. W obliczeniach zdecydowano, po wstępnych testach, na zastosowanie modelu turbulencji *transition SST*, który moim zdaniem, jest najlepszym wyborem dla tego typu przepływu. Podsumowując ten fragment należy podkreślić, że Doktorant zwrócił uwagę na wszystkie ważniejsze elementy procedury i kryteria modelowania numerycznego takie jak, dobór i zagęszczenie siatki obliczeniowej, dobór warunków brzegowych oraz dobór modelu turbulencji. W drugiej części tego rozdziału Doktorant opisał budowę i zasadę działania stanowiska doświadczalnego, wykorzystanego w badaniach, a znajdującego się w laboratorium Mechaniki Płynów Uniwersytetu Kaliskiego. Stanowisko to jest oprzyrządowane i wyposażone w układ pomiaru ciśnienia spiętrzenia, strumienia przepływającego czynnika oraz jego temperatury.

Najważniejszym, z punktu widzenia głównego celu pracy, jest **rozdział 5**, poświęcony analizie i interpretacji wyników. Zdefiniowano tu cztery zadania tj. analizę rozmieszczenia punktów poboru ciśnienia różnicowego Δp , porównanie charakterystyk przepływowych kryz w oparciu o analizy numeryczne oraz doświadczalne i na koniec określenie stałej straty ciśnienia zdefiniowanej jako $\Delta p_{str}/\Delta p$. W pracy, dla trzech zmiennych, tj. kąta γ nachylenie kryzy, modułu kryzy m i strumienia objętości, wykonano 168 symulacji, wszystkie dla liczby Reynoldsa $Re = 17600$. Analizując, zamieszczone w podrozdziale 5.1, rozkłady ciśnienia statycznego wzdłuż przepływu stwierdzono, że w zależności, czy linia z której pobierano dane, znajduje się na górnej, dolnej, czy na bocznych krawędziach rurociągu, wartości różnicy ciśnień, przed i za kryzą, różnią się od siebie. Dodatkowo, widoczne jest, że zwężenie strumienia za kryzą tzw. „*vena contracta*” wypada w różnym miejscu w zależności od jej parametrów geometrycznych. Wartościowym wynikiem rozprawy jest więc analiza i wskazanie właściwych, dla uzyskania wiarygodnych pomiarów strumienia przepływu lokalizacji punktów poboru ciśnienia, uzupełniona analizą porównawczą z lokalizacjami punktów zgodnymi z normą PN-93/M-53950 dla kryzy segmentowej. W kolejnej części podrozdziału 5.1. dla wszystkich przypadków geometrycznych (tabela 4.2) wyznaczono metodami numerycznymi oraz eksperymentalnymi charakterystyki przepływowe strumienia objętości cieczy q_v . Niestety nie dokonano, w tym miejscu, porównania uzyskanych wyników a wykresy na rys. 5.18 i 5.19 dotyczą innej wartości modułu. Następnie, również bez komentarza, zestawiono wyniki bezwymiarowej wartości stałej straty ciśnienia $\Delta p_{str}/\Delta p$. Porównanie i interpretację wyników zamieszczono dopiero w kolejnym podrozdziale

(5.2). Uważam to za niefortunną decyzję, ponieważ czytelnik ma utrudnione zadanie w ocenie uzyskanych wyników. Oceniając jednak sam efekt, niezależnie od układu pracy, należy podkreślić, że Doktorant wykazał bardzo dobrą zgodność charakterystyk przepływowych dla obu metod badawczych. W pierwszej części podrozdziału zamieszczono dodatkowo mapy prędkości średniej oraz ciśnienia statycznego. Komentarz do tego fragmentu sformułowałem w uwagach szczegółowych.

Kolejny rozdział, **rozdział nr 6**, poświęcony jest doświadczalnemu wyznaczeniu współczynnika przepływu C i porównaniu wyników z wartościami wyznaczonymi zgodnie z normą PN-93/M-53950 [73]. Jest to ważny parametr zależny od rodzaju zwężki/kryzy, jej modułu m , liczby Reynoldsa, chropowatości rurociągu itp., który jest najczęściej przedstawiany w postaci nomogramu prezentującego zależność C od liczby Reynoldsa dla różnych wartości modułu m . Doświadczalnie wyznaczone wartości współczynnika dla kryz zostały odniesione do teoretycznej wartości współczynnika przepływu C^* , wyznaczonego zgodnie z normą.

W ostatnim merytorycznym rozdziale (**rozdział 7**) przeprowadzono analizę warunków procesu samooczyszczania kryzy segmentowej skośnej. Zastosowano tu uproszczone podejście, polegające na wyznaczeniu, dla cząstek ciała stałego o określonej średnicy prędkości granicznej v_c przy której dochodzi do ich unoszenia. Znając wyznaczone numeryczne rozkłady pola prędkości określono następnie strefy zalegania cząstek. Dla badanego zakresu liczby Re wykazano, że dla kryzy o module $m=0,183$ i kącie $\gamma=30^\circ$ zachodzi proces samooczyszczania, o czym świadczy dość wysoki poziom tzw. współczynnika „samooczyszczania”

Pracę zamyka **rozdział 8**, w którym podsumowano uzyskane efekty, formułując pięć zasadniczych wniosków. Zestawione obserwacje, choć cenne z punktu widzenia praktycznego, to poza pierwszą, nie odnoszą się w pełni do sformułowanego pytania badawczego: „*Jak nachylenie płaszczyzny napływowej kryzy segmentowej ... wpłynie na zredukowanie obszaru gromadzenia się zanieczyszczeń?*”.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Poza ogólnymi uwagami w pierwszej części recenzji, nasuwają się następujące uwagi i spostrzeżenia:

- w pracy umieszczono dużą liczbę zestawień tabelarycznych. Uważam, że znacząca ich liczba, zamiast w treści pracy powinna być umieszczona w załącznikach. Zdecydowanie poprawiłoby to czytelność rozprawy.
- dokonano weryfikacji jakości siatki z punktu widzenia ortogonalności oraz czasu zbieżności obliczeń. Są to jednak globalne testy siatki. Nasuwają się wątpliwości, czy analiza wpływu jakości siatki na rozwiązanie, tylko w oparciu o takie parametry jest wystarczająca? Np. czy sprawdzano pozostałe parametry takie Aspect Ratio, Skewness?
- Z punktu widzenia modelowania przepływu z dużymi gradientami prędkości, a dotyczy to zwłaszcza obszaru przyściennego ważne jest poprawne zdefiniowanie siatki w tych

- obszarach. Jaka jest bezwymiarowa odległość pierwszego węzła siatki od ściany (wartość $y+1$) ?
- str. 41 – w pracy Doktorant posługuje się dość swobodnie pojęciem spiętrzenia i ciśnieniem spiętrzenia, tak naprawdę nie definiując tego ostatniego jednoznacznie. Przykładowo w wykazie oznaczeń Δp to ciśnienie różnicowe; str. 50 – mowa o „spiętrzeniu ciśnienia statycznego”, str. 41 – „wartość spiętrzenia Δp ”; str. 67 - korzystając ze spiętrzeń uzyskanych w symulacji, itp.
 - str. 59 – niewłaściwie sformułowane zdanie „...co w konsekwencji prowadzi do spiętrzenia ciśnienia (zwiększenia prędkości) płynu”;
 - str. 79. Nieprecyzyjne określenie „Wygenerowano 4 wirtualne linie składające się z pojedynczych punktów, (odcinki)...”
 - str. 81 - na wykresach 5.3 i 5.4 zidentyfikowano zafalowanie w rozkładzie ciśnienia. Jaka może być tego przyczyna?
 - str. 86 – proszę wyjaśnić zasadność zdania „Wpływ energii potencjalnej z powstających zawirowań w narożu krawędzi kryzy z rurociągami, jak i samej krawędzi powinien zostać przedstawiony w postaci wartości ciśnienia statycznego.”
 - interpretacja wpływu zaburzeń wprowadzanych przez krawędź kryzy, na rozkład ciśnienia statycznego (rys. 5.7), jest bardzo uproszczona. Czemu nie została przeprowadzona analiza rozkładu energii kinetycznej, czy też wirowości?
 - str 121 – mowa tu jest o przedstawionych mapach polach prędkości średniej. Pytanie jakie wielkości Doktorant analizuje? Czy jest to np. składowa wzdłużna, czy moduł prędkości? Na wykresach (np. rys.5.26 i 5.29) prawdopodobnie są pokazywane inne wielkości, na co wskazuje inna kolorystyka map prędkości. Uśrednione w czasie pole prędkości nigdy nie odwzorowuje struktur wirowych a jedynie średnie statystyczne, lokalne wartości prędkości. Dlatego nie ma podstaw by twierdzić że, „widać gdzie „gromadzą się wiry oderwane za kryzą” (str. 123), czy że nachylenie kryzy powoduje „osłabienie wirów powstających przed kryzą oraz wzmocnienie wirów bezpośrednio za kryzą” (str. 129).
 - rozdz. 5.2.1. - proszę omówić jaka jest, wg Autora, korelacja pomiędzy rozkładami prędkości a rozkładami ciśnienia,
 - na jakiej podstawie przyjęto średnicę cząstek stałych równą $d_{cz}=0,5\div 2$ mm? W bilansie sił działających na cząsteczkę nie uwzględniono kolizji pomiędzy cząsteczkami. Przy jakich warunkach przepływowych można przyjąć takie uproszczenie?
 - Do analizy procesu samooczyszczania kryzy zastosowano metodę bazującą na wyznaczeniu prędkości granicznej v_c . Alternatywą mogło być modelowanie przepływu dwufazowego z modelem Eulera lub modelem DPM, który jest zaimplementowany w ANSYS Fluent. Czy rozważano taką możliwość?

Inne uwagi:

- brak streszczenia pracy,
- brak spisów rysunków i tabel,
- str. 27 i 28 – ta sama numeracja dwóch rysunków,
- str. 59 – literówka „Measching”,
- str. 96 – nie zakończone zdanie w czwartym akapicie,

5. Główne walory rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy rozwoju metod pomiarowych stosowanych w określaniu strumienia objętości, a w tym konkretnym przypadku przepływomierzy spiętrzających. Należy podkreślić, że wiedza na temat wpływu różnych parametrów, w tym przepływowych, czy parametrów geometrycznych tych urządzeń pomiarowych na precyzję pomiaru ma duże znaczenie praktyczne. Dla pomiarów przepływów przemysłowych, które często zawierają zanieczyszczenia (przepływy dwu, czy nawet wielofazowe) Doktorant proponuje ciekawe rozwiązanie, polegające na zastosowaniu kryzy segmentowej skośnej. Wykorzystując zarówno numeryczne jak i eksperymentalne metody badawcze i prowadząc wielowariantową analizę parametryczną, wykazuje, że wprowadzenie skośnej kryzy pod odpowiednim kątem skutkuje zredukowaniem obszaru gromadzenia się zanieczyszczeń przed kryzą. Wartościowym efektem pracy są dodatkowo rekomendacje dotyczące lokalizacji punktów impulsowych do pomiaru ciśnienia oraz określenie rozkładów współczynnika przepływu C dla założonego zakresu liczby Reynoldsa.

6. Uwagi końcowe

Pomimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych stwierdzam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi samodzielne i oryginalne rozwiązanie zadania naukowego. Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań choć nie poszerzają istotnie stanu wiedzy dotyczącej przepływu przez systemy kryzowe to posiadają wyraźną wartość aplikacyjną. Można więc przyjąć, że Doktorant uzyskał zamierzone cele postawione na wstępie pracy.

Reasumując uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Heronimczaka, jest opracowaniem naukowym, spełniającym wymogi ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. 2022 poz. 574 z późn. zm.) wobec czego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

