

prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielwicz, czł. koresp. PAN  
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Instytut Energii  
Zakład Systemów i Urządzeń Energetyki Ciepłej  
80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12  
tel. +58 347 2254  
email: [Dariusz.Mikielwicz@pg.edu.pl](mailto:Dariusz.Mikielwicz@pg.edu.pl)

Gdańsk, 25 stycznia 2025 r.

## R E C E N Z J A

### pracy doktorskiej mgr inż. Marcina Heronimczaka pt. "Badanie właściwości metrologicznych kryzy segmentowej skośnej"

wykonana na podstawie przedłożonej rozprawy, której promotorem jest dr hab. inż. Mariusz Rzaśa, prof. PO, a promotorem pomocniczym dr inż. Andrzej Mrowiec, prof. UK.

#### 1. Przedmiot rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca pod tytułem „*Badanie właściwości metrologicznych kryzy segmentowej skośnej*” dotyczy identyfikacji i analiz eksperymentalnych oraz numerycznych przepływów z obecnością fazy rozproszonej w postaci ciała stałego o gęstości mniejszej od gęstości cieczy w kryzie pomiarowej segmentowej skośnej. Do tego typu przepływów nie stosuje się raczej klasycznych przepływomierzy mechanicznych ze względu na fakt, że części ruchome mogą się zabrudzić i przyczynić się do uszkodzenia takich przepływomierzy. Do celów pomiarowych można skorzystać z przepływomierzy nieinwazyjnych, jak przepływomierze ultradźwiękowe czy przepływomierze elektromagnetyczne. Można też skorzystać z klasycznych metod pomiarowych natężenia przepływu za pomocą kryz pomiarowych, a w szczególności kryzy segmentowej skośnej, czego właśnie dotyczy praca. Dysertacja jest monograficznym ujęciem tego skomplikowanego zagadnienia technicznego, które ma szerokie zastosowanie w praktyce.

Uważam, że w dobie daleko posuniętej automatyzacji pomiarów wystawionych na wymagające warunki pracy podjęta tematyka jest ważna, została właściwie wybrana i posiada do rozwiązania zagadnienia, które poza aplikacyjnym charakterem mają także aspekty naukowe. Temat rozprawy został w pełni zrealizowany co pozwoliło na uzyskanie założonego w pracy celu.

Praca liczy 184 strony. Brak jest w pracy streszczeń w języku polskim jak i angielskim, co stało się praktycznie standardem w pracach kwalifikacyjnych tego typu. Bibliografia opiera się na 105 pozycjach literaturowych z czego zawiera dwie, w których współautorem jest Doktorant.

We **wstępnym rozdziale** do pracy czytelnik wprowadzony jest w sposób ogólny do wymagań rozwijającego się świata oraz do konieczności doskonalenia metod pomiaru, między innymi także natężenia przepływu w niestandardowych przypadkach.

W **rozdziale pierwszym** do pracy czytelnik wprowadzony jest do tematyki ogólnej związanej z charakterystyką pomiarów natężenia przepływu poprzez przedstawienie



możliwych do zastosowania koncepcji przepływomierzy, z podziałem względem zasady działania na inwazyjne i nieinwazyjne. W dalszej części rozdziału Autor przedstawia zmodyfikowaną przez siebie kryzę segmentową oraz przedstawia wady i zalety pomiarów z kryzą segmentową oraz kryzą segmentową nachyloną. Tłumaczy, że kryza nachylona umożliwia mniejsze opory przepływu oraz dodatkowo usuwanie cząstek ciał stałych znajdujących się przed kryzą w górnej części rurociągu, co stanowi problem pomiarowy w zastosowaniach technicznych. Przedstawia oryginalną geometrię przepływomierza z kryzą segmentową, umożliwiającą badania trzech kątów nachylenia  $\gamma=10, 20$  i  $30^\circ$ . Na zakończenie rozdziału przedstawia hipotezę badawczą, cel pracy i zakres pracy. Hipoteza postawiona jest w postaci zdania pytającego: „Jak nachylenie płaszczyzny napływowej kryzy segmentowej podczas przepływu mieszaniny/zawiesiny, w której zanieczyszczeniami są ciała o różnej gęstości od przepływającej cieczy, wpłynie na zredukowanie obszaru gromadzenia się zanieczyszczeń?”.

**W rozdziale drugim** Doktorant omawia procedurę pomiaru przepływającego płynu przez typową kryzę pomiarową bez części segmentowej za pomocą klasycznego podejścia opartego o wzory z mechaniki płynów. Uwagę skupia na dyssypacji energii w kryzie, co ma wpływ na punkty, w których należy dokonywać pomiarów ciśnienia, żeby uzyskane wyniki były miarodajne. Wszystkie te prace są umiejętnie podsumowane.

**W rozdziale trzecim** przedstawione zostały aspekty związane z samooczyszczaniem się kryzy segmentowej skośnej. Wyznaczono kryteria przy których występuje proces separacji cząstek stałych z przepływem.

**W rozdziale czwartym** przedstawiono metodologię dotyczącą zastosowanych symulacji numerycznych oraz procedury eksperymentalne. Zdecydowanie więcej uwagi poświęcono modelowaniu numerycznemu. Omówione zostały warunki brzegowe zastosowane do zastosowanego modelu 3D badanych przypadków, omówiono aspekty związane z siatką obliczeniową i zastosowanym modelem turbulencji  $k-\omega$  SST. Omówiono metodykę przeprowadzania badań numerycznych. W drugiej części rozdziału przedstawia swoje stanowisko pomiarowe oraz aparaturę zastosowaną do przeprowadzenia pomiarów. Omawia metodykę przeprowadzania badań. Obie części są przejrzyste i zrozumiałe.

**W rozdziale piątym** przedstawiono analizę i interpretację otrzymanych wyników. Jest to najważniejszy rozdział w pracy. Wydaje się, że byłaby możliwość jego podziału na dwa. Przedstawiono punkty pomiaru ciśnienia na poboczniczy kanału. Wykreślono rozkłady ciśnienia w strefie przed kryzą pomiarową dla różnych kątów nachylenia i różnych modułów kryzy w poszczególnych liniach pomiarowych. Dla przypadku pomiaru na górnej tworzącej wykazano, że miejscem o maksymalnej wartości ciśnienia statycznego dla każdej przebadanej kryzy jest punkt przed kryzą pomiarową. Wyznaczono także rozkłady ciśnienia statycznego dla w strefie za kryzą pomiarową dla różnych kątów nachylenia i różnych modułów kryzy. Zanotowano występowanie minimum ciśnienia na krzywych, które przesuwa się w kierunku zgodnym z przepływem dla zmniejszającej się wartości modułu  $m$  i zwiększającej się wartości kąta odchylenia kryzy. Dla pomiarów na bocznych tworzących szukano wpływu generowanych wirów i zaburzeń generowanych przez otwór przelotowy dyszy. Wykazano tendencję do obniżania się wartości ciśnienia statycznego na fragmencie krzywej na płaszczyźnie prostopadłej do przepływu, przechodzącej przez płaszczyznę napływową kryzy. Dla pomiarów na dolnej tworzącej określono punkt, w którym zarejestrowano najniższą wartość ciśnienia statycznego za kryzą w zależności od przyjętego modułu oraz kąta nachylenia kryzy. Następnie przedstawiono analizy proponowanych punktów poboru ciśnienia kryzy segmentowej skośnej z punktami stosowanymi dla kryzy segmentowej wg normy PN-93/M-53950. W wyniku analiz wyznaczono względne zmniejszenie ciśnienia spiętrzenia na kryzie segmentowej skośnej w odniesieniu do wartości teoretycznej kryzy segmentowej, co umożliwiło w dalszej kolejności przedstawienie wyników w zależności od



modułu kryzy, kąta nachylenia  $\gamma$ , rozmiaru średnicy rurociągu oraz wartości natężenia przepływu. Przedstawiono na tej podstawie stosowne analizy. W wyniku jednej z nich opracowano charakterystyki przepływowe objętościowego natężenia przepływu przez kryżę w funkcji spadku ciśnienia dla różnych modułów i kątów nachylenia. Kolejnym krokiem było porównanie otrzymanych charakterystyk z tymi otrzymanymi z badań doświadczalnych. W tym przypadku również opracowano charakterystyki przepływowe kryzy dla różnych modułów oraz kątów nachylenia kryzy. Opracowano funkcje opisujące zależność objętościowego natężenia przepływu w funkcji spadku ciśnienia wraz z niepewnościami dopasowania współczynników funkcji. W części pracy związanej z interpretacją otrzymanych wyników przedstawione są obliczenia rozkładów prędkości dla kryz pomiarowych dla różnych kątów nachylenia kryzy oraz modułów. Wynika z nich wniosek, że ze wzrostem kąta nachylenia kryzy prędkość maksymalna w obszarze spiętrzenia ulega zmniejszeniu, podobnie jak zasięg obszaru, w którym płyn porusza się z podwyższoną prędkością. W dalszej kolejności Kandydat wyznaczył numerycznie rozkłady wektorów prędkości dla różnych modułów i kątów nachylenia kryzy. Potwierdzono za ich pomocą występowanie zawirowań w górnej części kryzy. Przedstawiono także rozkłady prędkości w przekrojach poprzecznych badanych kryz w różnych odległościach od kryzy. Wykazano w ten sposób zmianę przekroju strugi za kryżą oraz jej zasięg, redukcję wartości prędkości w przewężeniu kryzy, osłabienie wirów przed kryżą oraz wzmocnienie wirów bezpośrednio za kryżą. W kolejnym podrozdziale porównano charakterystyki przepływowe dla kryz segmentowych w odniesieniu do referencyjnych, obliczonych wg normy. Wyznaczono błąd dopasowania lokalnego, który nie przewyższa 4,5%. W dalszej części pracy porównano wyniki pomiarów natężenia przepływu uzyskane numerycznie i eksperymentalnie, uzyskując bardzo dobrą zbieżność. Opracowano funkcje opisujące objętościowe natężenie przepływu w funkcji spiętrzenia na kryzie.

**W rozdziale szóstym** analizowany jest współczynnik przepływu dla kryzy segmentowej. Wyznaczono parametr C w funkcji objętościowego natężenia przepływu oraz spiętrzenia na kryzie dla wartości geometrycznych oraz wyznaczono parametr C z normy, oraz parametrów geometrycznych kryzy. Przedstawiono tabele z wynikami porównań dla różnych wartości modułów m, przy braku kąta nachylenia kryzy. Następnie na rysunkach przedstawiono dodatkowo wpływ kąta nachylenia kryzy w funkcji liczby Reynoldsa. Następnie wyznaczono niepewności, które przyjmują największe wartości dla najniższych wartości liczb Reynoldsa. Na zakończenie rozdziału wyznaczono zależność średniej wartości współczynnika C w funkcji kąta nachylenia kryzy i teoretycznego współczynnika przepływu wyznaczonego na podstawie normy. Są to zdecydowanie zagadnienia trudne do kompleksowego opisanie i wartościowe z punktu analizy kryz segmentowych.

**W rozdziale siódmym** przedstawione analizy związane z samooczyszczaniem się kryzy skośnej dla zdefiniowanych cząsteczek zanieczyszczeń o zadanej średnicy i gęstości w strumieniu wody. Wyznaczono dla tych cząstek liczbę Archimedesą, a z niej za pomocą dedykowanego algorytmu wyznaczono prędkości unoszenia cząstek. Wykorzystując te dane wyznaczono wskaźnik porównawczy, będący stosunkiem zmiany wielkości „magazynowania” unoszących się cząsteczek przed kryżą segmentową skośną z danym kątem nachylenia do odpowiedniego obszaru w przypadku kryzy segmentowej bez kąta nachylenia.

**W rozdziale ósmym** to podsumowanie wyników pracy oraz wnioski. Należy stwierdzić, że struktura pracy jest typowa dla prac kwalifikacyjnych. Konstrukcja pracy tworzy logiczną całość i jest przejrzysta oraz czytelna. Niemniej, jak zaznaczyłem w opisie, w pracy są rozdziały kilkustronicowe jak również i 60-stronicowe, co nie przyczynia się do jej rekomendowanej struktury. Pozytywnie ocenić należy proporcję ilości stron pracy poświęconych przeglądowi literatury i części badawczej - część badawcza ma ponad



dwukrotnie większą objętość. W pracy przeanalizowano 105 pozycji literaturowe co dało wystarczająco szeroki widok na podjętą tematykę pracy.

## **2. Tezy badawcze pracy**

Doktorant w swojej pracy stawia bezpośrednio hipotezę badawczą: „Jak nachylenie płaszczyzny napływowej kryzy segmentowej podczas przepływu mieszaniny/zawiesiny, w której zanieczyszczeniami są ciała o różnej gęstości od przepływającej cieczy, wpłynie na zredukowanie obszaru gromadzenia się zanieczyszczeń?”. Jak widzimy nie jest to teza tylko zdanie charakteryzujące cel prowadzonych przez Doktoranta badań i potwierdza aspekty poruszone w przedstawionej do oceny pracy. Problem naukowy rozwiązany z pracy jest związany z opracowaniem modelu wyznaczania objętościowego natężenia przepływu w funkcji spiętrzenia na kryzie. Dodatkowo przeprowadzone analizy umożliwiły analizy gromadzenia się cząstek zanieczyszczeń przed i za kryzą.

Zakres prac spełnia oczekiwania stawiane pracom kwalifikacyjnym, czyli w pełny sposób wprowadza czytelnika w zagadnienia pomiarów natężenia przepływów w przypadku ruchu fazy ciągłej i rozproszonej, przedstawia ich dogłębną analizę za pomocą posiadanych badań pomiarowych oraz analiz wykonanych za pomocą własnego modelu wykorzystującego, formułując zalecenia do ich konfiguracji.

Doktorant wykazuje wypełnienie nakreślonego zakresu prac i dokumentuje je wynikami obliczeń.

## **3. Oryginalność pracy**

W mojej ocenie oryginalne osiągnięcia pracy to:

1. budowa stanowiska do badań kryzy segmentowej skośnej,
2. opracowanie algorytmu wyznaczania objętościowego natężenia przepływu w kryzie segmentowej skośnej w funkcji spiętrzenia na kryzie dla różnych modułów kryzy oraz różnych kątów nachylenia kryzy,
3. opracowanie procedur obliczeniowych do wyznaczania przepływu w kryzie segmentowej skośnej,
4. przeprowadzenie stosownych obliczeń przepływów w kryzie skośnej.

## **4. Wartości użytkowe pracy**

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się bardzo dużymi wartościami użytecznymi, gdyż zagadnienia poruszane w pracy dotyczą rzeczywistych rurociągów, w których wymagane jest wyznaczenie natężenia przepływu w obecności zanieczyszczeń. W takich przypadkach nie ma w pełni opracowanych modeli takich pomiarów. Zaproponowane narzędzia badawcze w postaci opracowanego modelu umożliwiają dogłębną analizę takich przepływów. Przeprowadzone analizy dotyczące szeregu parametrów wpływających na pomiary, jak zanieczyszczenia w przepływie, kąt nachylenia kryzy wzmacniają jakość przedstawionych analiz. Niemniej każde kolejne zastosowanie wymaga opracowania kolejnych dedykowanych algorytmów obliczeniowych. Pokuszono się o zaproponowanie zależności ogólnej do obliczeń, co niewątpliwie jest dużym osiągnięciem Kandydata. Prowadzenie pomiarów w instalacjach przepływowych bez wiedzy, która została przedstawiona przez Doktoranta wymaga dużego doświadczenia, które nabywa się latami analizując podobne przypadki.



## 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do oceny praca wskazuje, że Doktorant posiada wiedzę i potrafi ją przedstawić w formie rozwiązane zadania badawczego. Jest to niezwykle istotne dla ośrodków szkolnictwa wyższego i spełnia aktualne wymagania i oczekiwania przeprowadzonej reformy szkolnictwa wyższego. Praca jest ciekawa i wpisuje się w aktualne trendy naukowe związane z wprowadzaniem uczenia maszynowego do analiz skomplikowanych zagadnień. W mojej opinii praca jest wartościowa, niemniej jej oryginalność jest ograniczona do zagadnień indywidualnych kryz segmentowych. Doktorant wykorzystał posiadaną bazę pomiarów doświadczalnych i obliczeń numerycznych do opracowania wyniku w postaci zależności funkcyjnej. Przedstawiona analiza stanowi istotny wkład do problematyki pomiarów natężenia przepływu w kryzach segmentowych skośnych. Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest więc pozytywna. Praca porusza ważny problem i przedstawia wartościowe rezultaty.

Praktycznie trudno znaleźć mankamenty merytoryczne pracy, jeżeli przyglądamy się wynikom obliczeń i analiz. Praca napisana jest poprawnym językiem, z wykorzystaniem właściwej terminologii. Na uwagę zasługuje niezła strona edytorska pracy, ale autor nie uchronił się w szeregu miejscach przed uchybieniami językowymi i literówkami.

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem wymieniam poniżej:

1. Jakie są rekomendacje w stosunku do dalszych pracy w przedmiotowym obszarze?
2. Czy są możliwości uogólnienia uzyskanych wyników na inne średnice/przekroje kanałów?

Poza tym prosiłbym o wyjaśnienia w następujących kwestiach:

1. Niezrozumiałe jest przejście od wzoru (2.16) do (2.17).
2. Na jakiej podstawie zdecydowano o wprowadzeniu odległości 25.4mm na rys. 2.4?
3. Str. 38 – równanie (2.15) – jak jest zdefiniowana liczba przepływu  $\alpha$ ? Mile widziane byłoby wyprowadzenie tej liczby.
4. Na jakiej postawie przyjęto wymiar 3.5D przed kryzą oraz wymiar 8.5D za kryzą w odniesieniu do rys. 4.1? Wymiarów tych nie ma na przedmiotowym rysunku.
5. W sekcji 4.1.5 Autor pisze, że „... na budowanym stanowisku pomiarowym będzie można uzyskiwać wartość liczb Reynoldsa z zakresu 3500 do 19500, co odpowiada rozwijającemu się przepływowi turbulentnemu”. Czy naprawdę tak można powiedzieć dla tych wartości liczb Reynoldsa? Podobny komentarz do linii 73<sup>2</sup>.
6. Str. 132<sub>1</sub> – Autor pisze, że największy błąd dopasowania ma kryza z modułem  $m=0.470$  dla profilu PP.2, który wynosi 4.43%. Z rys. 4.1 wynika, że największy błąd jest dla modułu  $m=0.104$  i profilu PP.2. Proszę o komentarz.

W przewodniku do prac znajdują się nieliczne błędy edytorskie, które pokrótce wymieniam:

- 1) Str. 31<sub>14</sub> – jest „Computational”, powinno być „Computational”
- 2) Str. 36<sub>8</sub> – jest „... ponieważ wiąże się to z nierównomiernym rozkładem energii” – o jakiej energii mowa?
- 3) Str. 37<sup>1</sup> – Brak jest orzeczenia w zdaniu
- 4) Str. 38<sup>7</sup> – jest „niejednorodny”, powinno być „niejednorodnym”
- 5) Str. 54<sub>15</sub> – jest „Velocity Intel”, powinno być „Velocity Inlet”
- 6) Str. 59<sub>1</sub> – jest „Measching”, powinno być „Meshing”
- 7) Str. 60<sup>2</sup> – jest „frist height”, powinno być „first height”
- 8) Str. 59<sub>1</sub> – jest „Measching”, powinno być „Meshing”
- 9) Str. 65<sub>10</sub> – jest „Standrad”, powinno być „Standard”



- 10) Str. 88<sup>3</sup> – jest „cieśnienia”, powinno być „ciśnienia”
- 11) Str. 127<sub>2</sub> – jest „porzecznych”, powinno być „poprzecznych”
- 12) Tabela 5.21 – wartość parametru b dla kąta 0° powinna być  $-7.45 \times 10^{-4}$
- 13) Opis odciętej na rys. 7.4 powinien brzmieć „Liczba Reynoldsa ...”
- 14) Opis bibliograficzny pozycji [22], [29], [37], [54] i [79] jest niepełny.

## 6. Wniosek końcowy

Biorąc powyższe uwagi pod rozwagę stwierdzam, że w moim przekonaniu praca może stanowić rozprawę doktorską. Traktuję ją jako rzeczywisty wkład do teorii modelowania i pomiarów w kryzach segmentowych skośnych. Dotyczy ona systematycznych badań numerycznych, wspartych pomiarami eksperymentalnymi. Interpretacja wyników jest przekonywująca, o wysokim poziomie kompetencji Doktoranta. Uzyskane wyniki obserwacji oraz przeprowadzona analiza wyników jest interesująca, ważna zarówno z punktu widzenia poznawczego jak też i praktyki inżynierskiej. Autor przeprowadził rzetelny przegląd literaturowy, analizę posiadanych danych doświadczalnych i obliczenia za pomocą własnego narzędzia numerycznego. Wykazał się umiejętnością analizy wyników badań eksperymentalnych i numerycznych oraz głęboką wiedzą dotyczącą zagadnienia. Ponadto wykazał się dużą samodzielnością w rozwiązaniu postawionego zagadnienia. Uzyskane wyniki budzą zaufanie.

**Podsumowując** stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, recenzowana dysertacja może zatem stanowić podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*. Biorąc powyższe pod uwagę, **stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Marcina Heronimczaka do publicznej obrony.**

*Dariusz Kulwek*