

Prof. dr hab. inż. Dariusz Kardaś

Gdańsk 12.06.2023

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk

ul. Fiszera 14

80-231 Gdańsk

e-mail: dk@imp.gda.pl

**Recenzja osiągnięć w pracy naukowo-badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej
w postępowaniu habilitacyjnym dr inż. Marka Wasilewskiego**

Recenzja została opracowana na zlecenie Rektora Politechniki Opolskiej z dnia 6. 03. 2023 w związku z postępowaniem habilitacyjnym wszczętym w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*. Osiągnięcia naukowe podlegające ocenie zatytułowano *Analiza zjawiska przepływu aerozolu oraz doskonalenie konstrukcji odpylaczy cyklonowych, w szczególności cyklonów specjalnego przeznaczenia oraz opracowanie nowych wytocznych projektowych dla wysokowydajnych konstrukcji odpylaczy cyklonowych z uwzględnieniem różnych funkcji celów*.

Dr inż. Marek Wasilewski jako swoje podstawowe osiągnięcie zgłosił cykl 12 artykułów, powstałych w latach 2016-2022 i 2 patenty, które generalnie dotyczą zagadnień z inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki oraz inżynierii mechanicznej. Habilitant podjął się ważnego problemu technicznego o znaczącym wpływie na jakość życia człowieka oraz na stan środowiska naturalnego, czyli separacji cząstek stałych w mieszaninie spalin i popiołów. Wybrany urządzeniem jest cyklon, który ma szereg zalet w stosunku do innych separatorów cząstek stałych takich jak elektrofiltry, czy filtry tkaninowe, ponieważ nie wymaga zasilania energią, nie ma części ruchomych i może pracować w wysokich temperaturach. Tematyka separacji cząstek stałych w cyklonach jest bardzo ważna ze względu na duży udział separatorów cyklonowych w różnego rodzaju instalacjach przemysłowych.

Podstawowe osiągnięcie naukowo-badawcze jest przedstawione w 35 stronicowym streszczeniu, które zawiera omówienie 12 artykułów i dwóch patentów. Z tego powodu Kandydat wybierał rzeczy najważniejsze, ale formuła omawiania kolejnych publikacji spowodowała powtarzanie wcześniejszych wątków, co skutkowało tym, że lektura autoreferatu jest uciążliwa. Wiadomo, że streszczenie wielu prac o szerokim zakresie tematycznym (numeryka i eksperymenty) wymaga dużej

staranności i bywa trudniejsze, niż napisanie pełnej monografii. Wydaje się, że sposób redakcji osiągnięcia polegający na syntetycznym omówieniu wykonanych prac byłby lepszy i uczynił lekturę łatwiejszą.

Widocznym minusem autoreferatu jest brak wstępu zawierającego podstawy opisu przepływu w cyklonach, charakterystyki oddziaływań faza gazowa – faza stała, czyli zjawisk, które są podstawowe i bardzo istotnie wpływają na pracę separatora. Oddziaływania międzyfazowe są skomplikowane, ale procesy separacji cząstek zachodzą na poziomie mikroskopowym i dlatego sensowny byłby opis fizyki tych zjawisk. Rozumiejąc, że przedstawione prace dotyczą oceny pracy urządzenia, poprawy jego konstrukcji, a nie zagadnień przepływów dwufazowych, można było przygotować opis zjawiska separacji cząstek w strumieniu wirujących gazów. Cyklon jest urządzeniem dobrze znanym, jego konstrukcja nie jest szczególnie złożona, ale nie zmienia to faktu, że występują w nim różne części, różne powierzchnie, do których Autor się wielokrotnie odnosi. Niestety brakuje opisu i definicji podstawowych elementów konstrukcji cyklonu, a pierwszy rysunek cyklonu pojawia się na stronie 40. Formuła streszczenia poszczególnych artykułów ma sens, ale powinna stanowić samoistne *dzieło* z wprowadzeniem, jednolitym nazewnictwem, oznaczeniami i definicjami. W recenzowanym autoreferacie brakuje wyjaśnień i wprowadzenia do tematyki przepływów dwufazowych z cząsteczkami. Występują w nim pojęcia zrozumiałe dla Autora, ale niekoniecznie dla czytelnika nie będącego specjalistą w dziedzinie separatorów odśrodkowych, takie jak precesja rdzenia wiru, wewnętrzny wir wznoszący, wir zewnętrzny, definicje typu Stk_{50} , itp.

Celem przedstawionych badań było zdefiniowanie, przebadanie i opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych mających podnieść efektywność cyklonów. Zostało to zrealizowane w szeregu szczegółowych zadań, które można podzielić na dwie grupy. Pierwsza z nich, o bardziej podstawowym charakterze, miała na celu analizę i rozpoznanie zjawisk przepływowych zachodzących w cyklonach za pomocą metod obliczeniowych i pomiarowych. Druga grupa zadań polegała na opracowaniu udoskonalonych konstrukcji cyklonów przez zmianę geometrii lub wprowadzanie nowych elementów. We wszystkich zadaniach poznawczych stosowano narzędzia obliczeniowe w postaci różnych wersji programu *Ansys Fluent* oraz metodę PIV do wyznaczania pola prędkości.

We wszystkich pracach wykorzystywano ten sam program *Ansys Fluent*, ale z różnymi modelami turbulencji. Teoretycznie rozwiązanie dokładne równań Navier-Stokesa jest możliwe za pomocą metody DNS (Direct Numerical Simulation), ale w zastosowaniach technicznych zasadniczo jest nieracjonalne. Dobrze wiadomo, że nie ma uniwersalnych modeli turbulencji, ponieważ powstawały one w zastosowaniu do pewnej klasy przepływów. Autor rozpoczął modelowanie przepływów turbulentnych (praca A.1) od dwurównaniowego modelu k-e, gdzie obliczana jest energia kinetyczna ruchu turbulentnego i dyssypacja energii kinetycznej turbulencji. Drugi, bardziej zaawansowany to sześciórównaniowy model naprężeń Reynoldsa (RSM). W kolejnych pracach

zastosowana została także metoda dużych wirów (Large Eddy Simulation), gdzie duże wiry obliczane są bezpośrednio, a małe wiry są modelowane za pomocą podskalowego modelu turbulencji. Przez to metoda LES pozwala na analizę większych struktur turbulentnych odpowiedzialnych za większość przenoszonej energii turbulencji. Porównanie trzech modeli turbulencji, czyli k-e, RSM i LES pokazało, że LES jest najdokładniejsze w zastosowaniach do cyklonów jeśli chodzi o skuteczność separacji pyłów oraz spadek ciśnienia.

Z praktyki używania oprogramowania *Ansys Fluent* wiadomo, że podstawą dokładnych obliczeń numerycznych nie jest model fizyczny, choć oczywiście jest ona bardzo ważny, ale dobra siatka obliczeniowa o komórkach o niskiej skośności, najlepiej typu heksagonalnego, a nie tetrahedralnego. Oczywiście zdecydowanie łatwiej generuje się siatki o komórkach czworobocznych, ale stabilność procesu obliczeń i same wyniki są dużo niższej wartości, niż obliczenia z komórkami sześciobocznymi i wielobocznymi (polyhedron). Wyniki z pracy A5 pokazują, że najwyższa zgodność obliczeń z pomiarami, uzyskana została dla siatek sześciobocznych. Warto jednak podkreślić, że jest to oryginalny wynik w zastosowaniu do cyklonów, które mają swoją specyfikę polegającą na dużej wirowości przepływu.

Zdecydowana większość prac dotyczących separacji pyłów dotyczyła przepływów izotermicznych, stąd modele przepływowe składały się z równań ciągłości i pędu dla fazy ciągłej i równań ruchu dla fazy rozproszonej. Trzeba jednak dodać, że są w literaturze prace na temat modelowania wirowych przepływów dwufazowych gaz - cząstki stałe z uwzględnieniem równania energii. Niemniej jednak praca A1 miała na celu zbadanie wpływu temperatury na skuteczność separacji cząstek. Wyniki obliczeń ewidentnie pokazały, że wzrost temperatury powoduje spadek skuteczności separacji. Należy zgodzić się z konkluzją, że wyższa temperatura gazów i wyższa lepkość zmniejszają separację. W artykule A1 zaskakujący jest brak równania energii, gdy szczegółowo opisane są pozostałe równania bilansowe masy i pędu oraz równania na naprężenia turbulentne.

Ważną częścią osiągnięć Marka Wasilewskiego są laboratoryjne badania cyklonów z wykorzystaniem metody PIV wizualizacji przepływów. Prace zawierające metody numeryczne i eksperymentalne badania przepływów są bardzo wartościowe ponieważ to pomiary są nadal punktem odniesienia dla CFD. Wyniki pomiarów weryfikują użyteczność i poprawność obliczeń numerycznych. Metoda PIV była stosowana w badaniach opisanych w kilku publikacjach i potwierdziła swoją użyteczność w przepływach wirowych z cyklonami o przekrojach okrągłych jak i kwadratowych. Metodyka poszukiwania pola prędkości jest bardzo ważna i użyteczna, a uzyskanie wyników obliczeń numerycznych zgodnych z pomiarami może świadczyć o poprawnych badaniach oboma metodami, choć może być przykładem tego, że obie metody są niedokładne. W publikacji A8 tak bardzo chciano tej zgodności, że wbrew rysunkowi 6 stwierdzono, że wyniki pomiarów metodą PIV i wyniki obliczeń są podobne.

W większości artykułów stosowano założenie o stałej gęstości gazów, co jest uproszczeniem uzasadnionym w zależności od warunków cieplnych i przepływowych. Zastosowanie cyklonów do separacji gorących pyłów wiąże się ze zmianami temperatury na skutek wymiany ciepła z otoczeniem oraz zmianą ciśnienia. Wydaje się, że założenie o stałej gęstości gazów może generować duże odchylenia wyników obliczeń od ich rzeczywistych wartości i w kolejnych pracach Autor powinien mieć to na uwadze.

Istotną kwestią w ocenie pracy cyklonów są stosowane kryteria. W moim przekonaniu, tak jak podstawy mechaniki przepływów dwufazowych powinny stanowić ważną część wprowadzenia do osiągnięcia, również wielkości charakteryzujące jakość działania cyklonu powinny znaleźć się w autoreferacie. W autoreferacie pojawiają się takie oznaczenia jak Stk_{50} , d_{50} , Eu , kryterium Q , kryterium λ_2 , których znaczenia części można się domyślać, ale powinno to być jasno zdefiniowane.

Druga grupa prowadzonych badań dotyczy poprawy efektywności pracy cyklonów, zmian istniejących konstrukcji i wprowadzanie nowych elementów. W tym miejscu chciałbym podkreślić bardzo ważną zaletę prac Marka Wasilewskiego, czyli zintegrowane podejście do badań, które łączy praktykę, eksperymenty i obliczenia numeryczne, i których celem jest praktyczne wykorzystanie i wprowadzenie opracowanych rozwiązań do praktyki. Wiadomo, że nie każdy pomysł, nie każde rozwiązanie znajdzie zastosowanie w działającym urządzeniu, ale to dążenie do uzyskania konkretnego, lepszej konstrukcji jest widoczne i znajduje uznanie w moich oczach. Całość dokonań M. Wasilewskiego zyskuje właśnie dzięki istnieniu dobrze określonego celu użytecznego.

Parametry i umiejscowienie tzw. przeciwstożka w dolnej części separatora cyklonowego było pierwszym przykładem prób poprawy jego efektywności przez zmiany konstrukcyjne urządzenia. W tym celu zastosowano badania numeryczne i prace eksperymentalne. Opracowano metodę wyznaczania położenia przeciwstożka oraz jego kształtu. W wyniku tych prac udało się wyznaczyć najlepsze umiejscowienie przeciwstożka, przez określenie jego odległości od dolnego wylotu, pod względem najwyższej efektywności separacji cząstek. Wyznaczono kąt rozwarcia przeciwstożka oraz wyjaśniono przyczynę lepszej separacji cząstek, co sprowadza się do zablokowania porywania najmniejszych cząstek z dolnej części cyklonu.

Kolejnym przykładem poszukiwania optymalnych konstrukcji są badania różnych konfiguracji przewodu doprowadzającego mieszaninę dwufazową do komory wlotowej cyklonu. Przebadano aż 20 różnych konstrukcji różniących się pionowym i poziomym kątem nachylenia kanału wlotowego. Wnioski jakie wypływają to wzrost całkowitej skuteczności odpylania przy maksymalnych kątach nachylenia. Wzrost skuteczności odpylania jest wyraźny (2%) w przypadku kąta pionowego 90° . Inny pozytywny efekt to zmniejszenie średnicy odpylonych cząstek, bo Stk_{50} zmniejszyło się o ponad 20%. Zmiana kątów wlotu właściwie w każdej konfiguracji spowodowała znaczący wzrost spadku ciśnienia, przekraczający nawet 100%. Te badania pokazują jak można kształtować wlot mieszaniny do cyklonu

by poprawić jego efektywność. Inny sposób poprawy separacji poprzez zmiany konstrukcji polegał na zamontowaniu dodatkowego pręta umieszczonego centralnie w cyklonie. Sam pomysł nie jest nowy i są prace na ten temat, ale praca M. Wasilewskiego charakteryzuje szerokie spektrum analizowanych wariantów geometrii. Przeprowadzone badania pokazały, że wystąpiły pozytywne efekty samej hydrodynamiki w cyklonie polegające na stabilizacji przepływu w rejonie wiru wewnętrznego, większa symetria przepływu, poprawa profilu składowej osiowej wektora prędkości i poprawa profilu składowej promieniowej wektora prędkości. Kolejnym pozytywnym efektem montażu pręta była spadek fluktuacji ciśnienia oraz fluktuacji składowej stycznej wektora prędkości. Efekty praktyczne sprowadzają się do propozycji nowej konstrukcji z prętem w środku. Takie rozwiązanie jest optymalne przy wyznaczonych numerycznie proporcjach długości pręta do średnicy cyklonu i średnicy pręta do średnicy cyklonu.

Kolejny przykład modyfikacji i optymalizacji to hybrydowe cyklony kwadratowo-okrągłe. Przyczyny tych badań mają użyteczny charakter, motywowany potrzebą ochrony powierzchni wewnętrznych cyklonu przed erozją i zmniejszeniem spadku ciśnienia przy zachowaniu rozsądnej skuteczności separacji cząstek. Analizie poddano 5 różnych rodzajów cyklonów z korpusami o przekrojach kwadratowych i okrągłych, przy czym konstrukcja bazowa to separator o korpusie całkowicie kwadratowym. Konstrukcje hybrydowe okazały się być dużo bardziej efektywne, niż konstrukcja bazowa, co nie jest niespodzianką biorąc pod uwagę jej kształt. Niemniej jednak różnice pomiędzy pozostałymi konstrukcjami hybrydowymi są wyraźne. W zależności od potrzeb mogą być stosowane różne rozwiązania. W zastosowaniu do kotłów z cyrkulującym złożem fluidalnym preferowane będą cyklony o przekroju okrągłym na korpusie kwadratowym, zaś w przypadku cyklonu o przekroju kwadratowym na korpusie o przekroju okrągłym bardziej właściwe byłyby jako wstępne separatory cząstek.

Ostatni wątek badań konstrukcyjnych skupiony był na geometrii części stożkowej cyklonu. Wygenerowano 9 wariantów geometrii różniących się kształtem powierzchni stożkowej i długością sekcji cylindrycznej. Uzyskane wyniki dotyczą nie tylko optymalnej konstrukcji, ale również wpływu parametrów przepływowych. Większy wydatek przekładał się na wzrost całkowitej skuteczności odpylania, zmniejszenie średnicy separowanych cząstek i wzrost spadku ciśnienia. Wydłużenie stożka miało działanie przeciwne, bo zmniejszyło spadek ciśnienia, ale pogorszyło separację. Ta część badań pokazuje, że poprzez zmiany kształt powierzchni stożkowej i długości stożka w różny sposób wpływają na podstawowe parametry pracy cyklonu, ale wiedza na ten temat pozwala na dobór optymalnych konstrukcji dla danych zastosowań.

Podsumowując badania optymalizujące warunki pracy cyklonów odpylających i konstrukcji chcę podkreślić ich szerokie spektrum oraz stosowanie metod obliczeniowych łącznie z metodami eksperymentalnymi. W ten sposób podnosi się wartość uzyskanych wyników. Dwa patenty, w których

wykorzystano rezultaty badań są cennym uzupełnieniem uzyskanych wyników i celu prowadzonych prac.

Poza wymienionym i omówionym wcześniej cyklem publikacji, drugim istotnym osiągnięciem zgłoszonym do oceny jest *opracowanie wytycznych projektowych dla wysokowydajnych konstrukcji odpylaczy cyklonowych, z uwzględnieniem funkcji celu*. Osiągnięcie to jest wynikiem pracy doktorskiej i zostało opublikowane w obszernym artykule w czasopiśmie *Powder Technology*. Zgodnie z wytycznymi Rady Doskonałości Naukowej również efekty pracy doktorskiej mogą być przedłożone do oceny w postępowaniu habilitacyjnym. Uważam, że w/w publikacja jest istotnym osiągnięciem naukowym w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*. Przedstawione tam badania zawierają ważne wyniki pozwalające na optymalny dobór cyklonów pierwszego stopnia.

Oprócz osiągnięć naukowych warunkiem nadania stopnia doktora habilitowanego jest *istotna aktywność naukowa w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej*. Zdaniem Habilitanta przedstawiona w autoreferacie aktywność naukowa w innych niż macierzysta uczelnia instytucjach naukowych ma polegać na współpracy z kilkoma politechnikami, uniwersytetami i instytutami. W tym kontekście zostały wymienione m.in. Politechnika Poznańska i Wrocławska, Uniwersytet Warszawski, Uniwersytety w Kalkucie, Sikkim Manipal, Instytut Technologiczny Birla w Indiach, co samo w sobie świadczy o intensywnej współpracy. Jednakże tylko w jednej jednostce naukowej, mianowicie Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Nysie, Habilitant odbył krótki dwutygodniowy staż. Brakuje informacji o innych stażach, wizytach studyjnych, bądź zatrudnieniu w innej instytucji naukowej, a przecież zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 3 *Ustawy prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* warunkiem nadania stopnia doktora habilitowanego jest aktywność w co najmniej dwóch uczelniach lub instytucjach naukowych. Jednocześnie ta aktywność musi spełniać warunek istotności w zakresie osiągnięć, stanowiących znaczny wkład w rozwój dyscypliny. Właśnie ten element dorobku naukowego dr inż. M. Wasilewskiego jest w moim przekonaniu najślabszą częścią jego osiągnięć.

Jeśli chodzi o dorobek publikacyjny to według mojej oceny jest on znaczący, zawiera artykuły naukowe i rozdziały w monografiach. Habilitant wyróżnia się aktywnością jako recenzent w czasopismach naukowych, a liczba wykonanych przez niego recenzji robi wrażenie. Był promotorem pomocniczym doktoratu. Pełnił funkcję kierownika grantu badawczego NCN na temat analizy przepływów w odpylaczach z zastosowaniem anemometrii obrazowej, a obecnie kieruje innym grantem na temat odpylaczy. Dr inż. M. Wasilewski prowadzi aktywną działalność dydaktyczną na Politechnice Opolskiej, jest promotorem licznych prac dyplomowych. Jest współautorem dwóch skryptów akademickich. Również jego działalność popularyzatorska i organizacyjna jest znacząca.

Wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej dokumentacji i po jej analizie uważam, że zarówno cykl artykułów naukowych zatytułowany *Analiza zjawiska przepływu aerozolu oraz doskonalenie konstrukcji odpylaczy cyklonowych, w szczególności cyklonów specjalnego przeznaczenia, jak i opracowanie nowych wytycznych projektowych dla wysokowydajnych konstrukcji odpylaczy cyklonowych z uwzględnieniem różnych funkcji celów*, są istotnymi osiągnięciami naukowymi zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2 *Ustawy prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. Tym samym stwierdzam, że dr inż. Marek Wasilewski spełnia warunki nadania mu stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.



