

prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki
ul. Raławicka 15-17
75-620 Koszalin

Koszalin, 17.08.2022 r.

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Kędzierskiego nt.:

„Badania eksperymentalne i modelowanie pracy niskoprężnych strumienic dwufazowych cieczo-gazowych”

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Białostockiej prof. dr hab. inż. Romualda Mosdorfa – Umowa o dzieło nr 33/WM/2022, pismo z dnia 06.07.2022 r.

Promotorem recenzowanej pracy jest prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 183 strony oraz 67 stron załączników. Rozprawa została podzielona na osiem rozdziałów. Dodatkowo podano: wykaz oznaczeń i symboli, bibliografię, wykaz tabel i rysunków, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz cztery załączniki. W treści rozprawy zawarto:

1. **Wprowadzenie**, gdzie zwrócono uwagę na znaczenie niskoprężnych strumienic cieczo-gazowych w zastosowaniach inżynierskich. Zwrócono też uwagę na systemy oczyszczania gazów w oparciu o układy strumienicowe.
2. **Krytyczny przegląd wiedzy** w zakresie rozpoznania zjawisk fizycznych zachodzących w strumienicach cieczo-gazowych. Opisano zasadę działania i budowę takich strumienic oraz w zarysie historycznym wyniki badań uzyskane przez różnych autorów. Szczególną uwagę zwrócono na zjawiska fizyczne zachodzące w układzie dwufazowym cieczo-gaz, jednak bez przypadków przemian fazowych. Analizie poddano również uwarunkowania systemów oczyszczania gazów spalinowych z wykorzystaniem strumienic.
3. **Cel, zakres i tezę pracy**. Podano główne przesłanki związane z pojęciem tematu rozprawy, opisano cel, szczegółowo przedstawiono zakres oraz podano tezę pracy.
4. **Stanowisko badawcze i metodykę badań**. Szczegółowo opisano koncepcję i budowę stanowiska laboratoryjnego, budowę strumienicy, układ kontrolno-pomiarowy, plan badań eksperymentalnych, procedury badawcze oraz procedury analizy wielkości fali mieszającej.

5. **Wyniki własnych badań eksperymentalnych**, które przeprowadzono przy różnych wariantach pracy strumienicy. Wyznaczono wpływ lokalizacji dyszy napędowej na pracę strumienicy i długość fali mieszającej, wyznaczono charakterystyki pracy strumienicy o różnej geometrii itp.
6. **Pólempiryczny model strumienicy cieczowo-gazowej**. Podano założenia do modelu, po wprowadzeniu uproszczeń zaprezentowano model pracy strumienicy rurowej, który poddano szczegółowej analizie w zakresie różnych parametrów przepływowych.
7. **Wyniki badań eksperymentalnych w zakresie aplikacji strumienicy dwufazowej do odsiarczania spalin**. Badania przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku badawczym zawierającym reaktor strumienicowy podłączony do silnika spalinowego. Uzyskane wyniki wskazują na spełnienie wymogów emisyjnych zgodnie z obowiązującymi normami.
8. **Podsumowanie i wnioski**, które opracowano na podstawie uzyskanych wyników prac koncepcyjnych, konstrukcyjnych i badań eksperymentalnych zaproponowanego urządzenia strumienicowego.
9. **Bibliografia** zawierająca 116 pozycji literatury polskiej i zagranicznej w postaci artykułów naukowych i pozycji książkowych.
10. **Załączniki** (w liczbie 4 sztuki), które zawierają: 1 – tabela wyników pomiarów, 2 – rysunek złożeniowy strumienicy, 3 – rysunek dysz napędowych, 4 – rysunek lokalizacji punktów pomiarowych w komorze mieszania.

2. Cel, zakres i teza pracy

Doktorant podał, że głównym celem pracy jest opracowanie narzędzia pozwalającego na predykcję parametrów wydajnościowych strumienicy cieczowo-gazowej o zadanej geometrii. Autor podał także tezę swojej pracy w postaci: *”Na parametry wydajnościowe mają zasadniczy wpływ zarówno parametry pracy takiej strumienicy, jak i geometria elementów składowych tego urządzenia. Założone parametry pracy strumienicy warunkują dobór odpowiednich cech geometrycznych elementów składowych strumienicy, w tym w szczególności komory mieszania”*. W pracy podano również zakres pracy doktorskiej, który obejmuje przeprowadzenie systematycznych badań eksperymentalnych opracowanej konstrukcji strumienicy w taki sposób, aby było możliwe opracowanie równań zamykających model strumienicy opartych na wynikach tych badań.

Mając na uwadze konieczność udowodnienia swojej tezy Doktorant przeprowadził analizę literatury dotyczącej modelowania zjawisk zachodzących w strumienicach, opracował koncepcję strumienicy gazowo-cieczowej o zmiennej geometrii, zaprojektował i wykonał stanowisko badawcze wraz ze wszystkimi elementami badanej strumienicy, opracował plan eksperymentu, wykonał badania eksperymentalne dla powietrza i dwutlenku węgla jako zasasywanych gazów, dokonał analizy uzyskanych wyników badań, przeprowadził badania wizualizacyjne w celu określenia parametrów fali mieszającej oraz opracował zależności kryterialne pozwalające wyznaczać współczynniki i parametry przepływowe strumienicy. W ramach tego zakresu działań i uzyskanych rezultatów Doktorant w pełni uzasadnił postawioną tezę swojej pracy.

3. Rozwinięcie tezy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy poszukiwania nowych rozwiązań w zakresie podwyższania sprawności energetycznej maszyn i urządzeń i lepszego wykorzystania energii pierwotnej stosowanej do ich napędu. Malejące rezerwy paliw konwencjonalnych zmuszają nas obecnie do takiego działania. Autor rozprawy proponuje wykorzystanie w instalacjach energetycznych strumienic cieczowo-gazowych, to jest urządzeń, których zadaniem jest zasysanie gazu z zastosowaniem fazy ciekłej jako czynnika napędowego, a następnie zmieszanie i sprężenie powstałej mieszaniny cieczowo-gazowej. Autor przedstawia liczne przykłady zastosowań takich urządzeń. Szczególną uwagę zwraca na możliwość wytworzenia jak największej gęstości objętościowej powierzchni rozdziału faz warunkującej prowadzenie procesów absorpcji. Jest to główna motywacja podjęcia tematu rozprawy, ze względu na możliwość opracowania skutecznych rozwiązań kompaktowych urządzeń do oczyszczania gazów spalinowych, alternatywnych w odniesieniu do konwencjonalnych skrubców.

Mając powyższe na uwadze Doktorant podjął próbę wykonania rzeczywistego modelu strumienicy cieczowo-gazowej o zmiennej geometrii. Opracował rysunki projektowe i na ich podstawie wykonano elementy strumienicy. W celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych przygotowano stanowisko badawcze w trzech wariantach. Wariant pierwszy wykorzystano do prowadzenia pomiarów, których celem było wyznaczenie parametrów ciepło-przepływowych czynników roboczych w postaci wody i powietrza, przy regulacji ciśnienia i strumienia masy czynnika napędowego oraz przeciwcisnienia po stronie tłocznej. W drugiej wersji prowadzono badania przy regulacji ciśnienia i strumienia masy czynnika napędowego oraz ciśnienia ssawnego czynnika zasysanego. Przy kolejnej wersji stanowiska badawczego prowadzono pomiary z wykorzystaniem dwutlenku węgla jako gazu zasysanego. Podczas badań wykonywano pomiary dla sześciu typów dysz napędowych o dwóch konstrukcjach. Pierwsza z nich to była dysza *Bendemana*, druga to dysza ostrokrawędziowa. Każda z dysz została wykonana o średnicy wylotowej 1 mm, 2 mm i 3 mm. Systematyczne badania zostały zrealizowane dla trzech różnych komór mieszania o różnej długości, to jest 300 mm, 500 mm i 700 mm. Podczas pomiarów wykonano dodatkową serię badań z użyciem zawirowacza dla każdej dyszy napędowej. Wykorzystano go, aby zwiększyć efekt strumienia napędowego poprzez nadanie mu prędkości obrotowej. System kontrolno-pomiarowy składał się z czujników i przetworników wielkości fizycznych, zainstalowanych na stanowisku badawczym, urządzeń wykonawczych automatyki, urządzenia pomiarowego oraz oprogramowania zarządzającego zainstalowanego na komputerze PC. Podczas badań eksperymentalnych wykonano 2698 punktów pomiarowych, większość z nich udokumentowano zdjęciami struktur przepływu w komorze mieszania strumienicy. Dla tych punktów pomiarowych przeanalizowano pracę strumienicy oraz parametry fali mieszającej. W szczególności badania dotyczy wpływu lokalizacji dyszy napędowej, to jest odległości jej od początku komory mieszania, rozkładu ciśnień w komorze mieszania, lokalizacji i długości fali mieszającej itp. Na podstawie badań eksperymentalnych opracowano charakterystyki pracy strumienicy w postaci zależności stosunku sprężu od współczynnika zasysania dla różnych warunków pracy, zależności stosunku zasysania od ciśnienia tłoczenia oraz charakterystyki przedstawiające sprawność badanej strumienicy w stosunku do parametru jakim jest spręż.

W rozdziale szóstym Doktorant przedstawił własny model półempiryczny strumienicy cieczowo-gazowej, w oparciu o który możliwym jest sporządzenie charakterystyki pracy strumienicy oraz dokonanie analizy wpływu zasadniczych parametrów geometrycznych na jej sprawność. W zaprezentowanym modelu opis pracy strumienicy oparto na analizie równania zachowania pędu, wprowadzając do analizy dwie podstawowe wielkości opisujące przepływ dwufazowy: poślizg międzyfazowy i stopień zapełnienia. Po wprowadzeniu założeń uprasza-

jących rozważania prowadzono dla strumienicy rurowej. W wyniku przeprowadzonych rozważań opracowano korelacje pozwalające wyznaczyć: współczynnik prędkości w komorze mieszania i długość fali mieszania oraz miejsce jej powstania.

W rozdziale siódmym przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych aplikacji strumienicy dwufazowej do odsiarczania spalin. W ramach prowadzonych prac badawczych przygotowano reaktor strumieniowy w postaci baterii czterech strumienic, który podłączono do silnika spalinowego. Uzyskane wyniki badań potwierdziły wysoką skuteczność zaproponowanego układu oczyszczania spalin. Na ich podstawie zgłoszono do urzędu patentowego wynalazek, którego współautorem jest autor opiniowanej rozprawy.

Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych zostały opracowane wnioski, które potwierdzają postawioną tezę rozprawy oraz słuszność zastosowanych nowych rozwiązań konstrukcyjnych związanych z wykorzystaniem energii strumienia cieczy do zasysania i sprężania gazu.

4. Oryginalność i wartości poznawcze pracy

Zaproponowany przez Doktoranta temat rozprawy doktorskiej wynika z potrzeby prowadzenia prac badawczych w zakresie podnoszenia sprawności maszyn i urządzeń energetycznych oraz lepszego wykorzystania energii pierwotnej stosowanej do ich napędu. W przedmiotowym przypadku dotyczy to urządzeń strumienicowych cieczo-gazowych. Pomimo licznych publikacji w tym zakresie problematyka ta nie została jeszcze w pełni zbadana i opisana. Istnieje dalsza potrzeba prowadzenia prac badawczych. Wynika to z konieczności poprawy konstrukcji i lepszego wykorzystania tych urządzeń w licznych zastosowaniach praktycznych. Pozwoli to na osiągnięcie efektu synergii i wzrostu współczynników sprawności i efektywności działania. Doktorant zaproponował tezę swojej rozprawy, co pozwoliło uzyskać wymierne osiągnięcia, do których należy zaliczyć:

- a) przeprowadzenie wnikliwej analizy położenia i długości fali mieszającej formułującej się w komorze mieszania strumienicy,
- b) opracowanie oryginalnej koncepcji i wykonanie stanowisk badawczych umożliwiających przeprowadzenie szczegółowych pomiarów cieplno-przepływowych strumienic o różnej konstrukcji,
- c) opracowanie i wykonanie stanowiska badawczego umożliwiającego badania wizualizacyjne zjawisk przepływu dwufazowego w komorze mieszania strumienic,
- d) opracowanie i wykonanie układu akwizycji danych pomiarów, w szczególności rejestracji i analizy obrazu przepływu dwufazowego i tworzenia się fali mieszającej,
- e) zbadanie charakterystyk pracy strumienic o różnej konstrukcji, które wykazały ścisłe zależności geometryczne w stosunku do parametrów wydajnościowych urządzenia,
- f) wykazanie, że istnieje optymalna lokalizacja dyszy napędowej w stosunku do komory mieszania, po której przekroczeniu zmiana odległości nie ma istotnego znaczenia na ilość zasysanego gazu,
- g) potwierdzenie, że lokalizacja fali mieszającej oraz jej długość ma zasadnicze znaczenie przy doborze odpowiedniej komory mieszania,
- h) opracowanie metody lokalizacji fali mieszającej, która jest związana ze wzrostem ciśnienia w komorze mieszania. Na podstawie własnych badań eksperymentalnych stwierdzono, im wyższe są wartości sprężu strumienicy, tym krótszy jest odcinek rozpadu strugi

cieczy napędowej i fala mieszająca zlokalizowana jest na krótszej odległości od początku komory mieszania,

- i) wykazanie, że współczynnik prędkości komory mieszania nie można traktować jako parametru stałego, a jego wartość jest uzależniona od struktury przepływu dwufazowego formującego się w komorze mieszania,
- j) zaproponowanie zależności kryterialnych na wyznaczenie: współczynnika prędkości komory mieszania, a także lokalizacji oraz długości fali mieszającej.

Reasumując należy stwierdzić, że Doktorant opracował oryginalne i wartościowe rozwiązania koncepcyjne pozwalające na wzrost sprawności i efektywności energetycznej urządzeń wykorzystujących energię kinetyczną strumienia cieczy. Uzyskane wyniki przeprowadzonych prac koncepcyjnych, badań eksperymentalnych, analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

5. Wartości użytkowe pracy

Prezentowana rozprawa doktorska ma duże znaczenie aplikacyjne. Dotyczy ona bardzo istotnego problemu lepszego wykorzystania urządzeń w postaci strumienic cieczenio-gazowych. Ciągły wzrost cen surowców energetycznych oraz malejące zasoby konwencjonalnych źródeł ciepła wymuszają konieczność poszukiwania nowych rozwiązań o wyższej sprawności i efektywności pracy. Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązanie w postaci strumienicy cieczenio-gazowej wykorzystuje energię kinetyczną cieczy do zasysania i sprężania gazów. Takie rozwiązanie ma swoje zalety i wady. Zaletą jest brak elementów ruchomych, co praktycznie gwarantuje dużą trwałość i niezawodność oraz eliminuje możliwość wystąpienia awarii. Wadą jest niska sprawność i efektywność pracy. Dlatego ważnym jest prowadzenie prac badawczych nad podniesieniem tych wielkości. W wyniku przeprowadzonych analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych zaproponowano wskazówki projektowe, w jaki sposób konstruować tego typu strumienice, aby zwiększyć ich sprawność i wydajność zasysania czynnika gazowego. Z przeprowadzonych rozważań wynika, że ważną rolę odgrywa tutaj konstrukcja komory mieszania, jej wymiary geometryczne, budowa dysz, stosunek ciśnień roboczych, natężenie przepływu cieczy napędowej itp. Doktorant podaje praktyczne zależności pozwalające wyznaczyć poszczególne wielkości, w tym wartość współczynnika prędkości komory mieszania, a także lokalizację i długość fali mieszającej. Doktorant wskazał przykłady możliwych zastosowań proponowanych rozwiązań. Należy tutaj wyróżnić zastosowanie strumienicy dwufazowej do odsiarczania spalin. Uzyskane wyniki potwierdziły wysoką skuteczność zaproponowanego układu do oczyszczania spalin. Takie rozwiązanie może być wykorzystane w warunkach morskich na statkach, gdzie wymagana jest wysoka czystość spalin. Świadczy to o bardzo dużym potencjale praktycznym ocenianej pracy. W oparciu o uzyskane rezultaty zgłoszono wynalazek w Urzędzie Patentowym, którego współautorem jest Autor niniejszej rozprawy. Wszystko to oznacza, że prezentowana rozprawa w pełni spełnia wymagania stawiane doktoratom wdrożeniowym.

Prezentowana rozprawa jest istotnym wkładem Autora w zakresie poszukiwania nowych rozwiązań i ich wdrożenia do projektowania i eksploatacji urządzeń wykorzystujących energię kinetyczną strumienia cieczy. Poprawa ich sprawności i efektywności pracy z pewnością przyczyni się do wzrostu ich wykorzystania i zastosowań praktycznych. Jest to szeroko pojęte działanie zmierzające do racjonalnego gospodarowania energią pierwotną, racjonalnym gospodarowaniem i zwiększeniem jej oszczędności.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. Doktorant zaprojektował strumienicę cieczerw-gazowa o geometrii w kilku wariantach. Dotyczy to r6wnie dysz nap6dowych i zawirowywaczy. Nie poda natomiast czym si6 kierowa ustalajac poszczególne wymiary geometryczne strumienicy, dysz i zawirowywaczy. Czy zostały one ustalone a priori, czy może prowadzono jakie obliczenia optymalizacyjne? Należy to wyjani6.
2. W pracy zamieszczono wyniki pomiar6w w licznych tablicach. W niekt6rych z nich zaznaczono kolorami wybrane wielkości pomiarowe (np. Tabela 4.6, 5.3, 5.4 itp.). Jednak nie można odnale6 w pracy informacji na temat, co oznaczaja poszczególne kolory.
3. Na rys. 5.1 nie podano oznaczeń dla dw6ch charakterystyk.
4. Autor używa poje6: wsp6lczynnik rozładowywania napr6enia (strona 21), wsp6lczynnik powierzchni (str. 25), sprawno6 dyszy (strona 103) i sprawno6 strumienicy. W pracy nie podano jak liczono te wsp6lczynniki oraz sprawno6 dyszy, a na stronie 112 podano tylko w spos6b og6lny co to jest sprawno6 strumienicy. Wskazany jest podanie wzor6w obliczeniowych do wyznaczenia tych wartości.
5. W rozdziale 5.5 Autor podaje wyniki badań w postaci licznych wykres6w (rys. 5.29 – 5.34). Nie podaje jednak oznaczenia poszczeg6lnych punkt6w pomiarowych (r6zne kolory). Można si6 jedynie domyla6, że cyferki oznaczaja ´rednice dysz, a co oznacza poszczeg6lny kolor to jest nieznanne.
6. W rozdziale 6 we wzorze (6.26) wyst6puje ułamek $\frac{w_{wt}}{w_{wo}}$, jednak z poprzednich rozwaa wynika, że powinno by6 $\frac{w_{lt}}{w_{lo}}$. R6wnie we wzorze (6.30), zamiast $\frac{w_{gt}}{w_{lo}}$, powinno by6 $\frac{w_{lt}}{w_{lo}}$.

Uwagi edytorskie

- ogólne

1. Należy podkreli6 wysoki poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod wzgl6dem edytorskim. Zwraca uwag6 wysoka jako6 opracowania całego maszynopisu.
2. W pracach naukowych, opracowaniach ksiazkowych, zwyczajowo nie stawia si6 kropek w podpisach rysunk6w i tablic. W opiniowanej rozprawie znaki kropek w/w miejscach sa zb6dne.
3. Ponadto należy zwraca6 uwag6, aby na końcu wiersza nie pozostawała wolna litera. Ładniej jest edytorsko, kiedy znajduje si6 ona na poczatku wiersza przed wyrazem, kt6remu towarzyszy.

- szczeg6łowe

1. Na str. 20, 14 wiersz od dołu jest zapis „*strumienicy cieczerw-gazowej.*”, powinno by6 *strumienicy cieczerw-gazowej.*” – bez spacji.
2. Na str. 22, 13 wiersz od dołu zapisano „*Niestety w tej ;pracy r6wnie...*”, powinno by6 „*Niestety w tej pracy r6wnie ...*”.
3. Na str. 29, 6 i 4 wiersz od dołu zapisano „...CO2 oraz SO2/CO2”, powinno by6 „...CO2 oraz SO2/CO2”.

4. Na str. 30 w Tabeli 2.1 zapisano „*Współczynnik SO₂ [ppm]/ CO₂ [ppm]*”, powinno być „*Współczynnik SO₂ [ppm]/ CO₂ [ppm]*”. Dotyczy to również strony 36, 41.
5. Na str. 33, na rys. 3.3 jest opis osi w języku angielskim, powinien być podany w języku polskim”. Dotyczy to również rys. 2.7.
6. Na stronie 37, 12 wiersz od góry, jest „*Za kluczowy aspekt poznawczy planowanych osiągnięcia w ramach niniejszej rozprawy uznaje się*”. Powinno być „*Za kluczowy aspekt poznawczy planowanych osiągnięć w ramach niniejszej rozprawy uznaje się*”.
7. Str. 68, 5 wiersz od dołu jest „*...przygotowano plan uwzględniający*”. Powinno być „*...przygotowano plan uwzględniający*”.
8. Tabela 5.4 jest nieczytelna.
9. Na stronie 149, 3 wiersz od dołu jest „*Natomiast stanowisko badawcze ukazano na Rys. 7.2 oraz na zdjęciu 7.3.*” Powinno być „*Natomiast stanowisko badawcze ukazano na Rys. 7.3 oraz na zdjęciu 7.4.*”.
10. Na stronie 157, 4 wiersz od góry jest „*...dwutlenku siarki oraz dwutlenku....*”, powinno być „*...dwutlenku siarki oraz tlenu....*”.

7. Uwagi końcowe

Prezentowana rozprawa doktorska napisana jest rzeczowo i w sposób zrozumiały. W pracy jest mało błędów językowych i edytorskich. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych dotyczących nowych rozwiązań w zakresie urządzeń strumieniowych. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy, którą oceniam bardzo pozytywnie.

8. Wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Białostockiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazał także umiejętności wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu zjawisk cieplno-przepływowych w prowadzeniu analiz teoretycznych, badań eksperymentalnych i opracowania uzyskanych wyników. Obok odpowiedniego poziomu naukowego rozprawy, należy podkreślić duży stopień jej aplikacyjności. Doktorant wskazał przykłady możliwych zastosowań proponowanych rozwiązań. Ponadto uzyskane wyniki badań umożliwiły dokonanie zgłoszenia w Urzędzie Patentowym wynalazku, którego współautorem jest Autor niniejszej rozprawy. Oznacza to, że prezentowana rozprawa w pełni spełnia wymagania stawiane doktoratom wdrożeniowym. Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Mateusza Kędzierskiego, jako rozprawy doktorskiej odpowiadającej warunkom określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz.U. z 2022 r., poz. 574) i o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto **zgłaszam propozycję wyróżnienia niniejszej rozprawy**, jeżeli pozwalają na to przepisy obowiązujące w Politechnice Białostockiej. Praca ta stanowi znaczące osiągnięcie Autora i jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich rozwiązań w zakresie maszyn i urządzeń energetycznych. Uzyskane wyniki przeprowadzonych analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu. Oryginalność i istotność zaproponowanego rozwiązania problemu naukowego, znacznie przewyższają wymagania niezbędne do obrony pracy doktorskiej.