

Dr hab. inż. Sławomir PIETROWICZ, prof. uczelni

Wrocław, 05.06.2019 r.

Katedra Termodynamiki,

Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Politechnika Wrocławska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Karola Kaczmarskiego

**pt. „Modelowanie nagrzewania rurociągu łączącego kocioł z turbiną–zagadnienia
bezpośrednie i odwrotne”**

1. Informacje ogólne

Praca wykonana została w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej im. T. Kościuszki pod kierunkiem promotora Pana dr hab. inż. Piotra Dzierwy, prof. Politechniki Krakowskiej, promotorem pomocniczym pracy był Pan dr hab. inż. Marcin Trojan, prof. Politechniki Krakowskiej. Recenzję opracowano w oparciu o uchwałę Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 17.04.2019 r.

Praca doktorska została przedstawiona na 140 stronach i zawiera dziesięć rozdziałów, które poprzedza spis treści i wykaz ważniejszych oznaczeń, kończy natomiast wykaz literatury (132 pozycji) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

2. Omówienie treści pracy

Generalnie przedstawiona dysertacja Pana mgr inż. Karola Kaczmarskiego dotyczy zagadnień związanych z projektowaniem i eksploatacją elementów ciśnieniowych aparatury przemysłowej i energetycznej. Zagadnienia podjęte w pracy są aktualne

z punktu widzenia naukowego oraz aplikacyjnego, co potwierdza duża ilość publikacjach naukowych z ostatnich lat cytowanych w pracy. Praca zawiera obszernie obliczenia zarówno programami komercyjnymi jak i programami własnymi. Wyniki uzyskane w pracy zostały zweryfikowane z danymi pomiarowymi, co znacząco podnosi wartość pracy.

3. Szczegółowa charakterystyka pracy

We wstępie doktorant przedstawił charakterystykę pracy rurociągu parowego jako elementu grubościennego oraz ewentualne zagrożenia, jakie mogą występować w warunkach niustalonych jego pracy. Ciśnieniowe elementy grubościenne kotła ograniczają szybkości nagrzewania oraz ochładzania podczas rozruchu lub wyłączenia kotła z ruchu. W czasie pracy w warunkach niustalonych, w ściankach tych elementów występują znaczne różnice temperatury, które są przyczyną powstawania wysokich naprężeń termicznych. Prowadzi to do powstawania pęknięć zmęczeniowo-ciepłnych, a w konsekwencji do awarii. Ważne jest więc określenie dopuszczalnych szybkości zmian temperatury, które zapewnią bezpieczną i długotrwałą eksploatację kotła.

W rozdziale drugim autor opisuje dotychczasowy stan badań związany z tematyką modelowania zjawisk przepływowo-ciepłnych w rurociągach parowych. W celu wyboru odpowiedniego podejścia zmierzającego do rozwiązania zagadnienia będącego przedmiotem badań, dokonana została analiza dostępnej literatury zarówno krajowej i zagranicznej.

W rozdziale trzecim pt. „*Teza i zakres pracy*” został przedstawiony główny cel pracy, którym jest opracowanie modelu matematycznego rurociągu parowego łączącego kocioł OP-380 z turbiną. Do jego realizacji zostały określone następujące zadania cząstkowe:

- 1) *Wyznaczenie dopuszczalnych szybkości nagrzewania/ochładzania dla elementów krytycznych.*
- 2) *Opracowanie modelu matematycznego wykorzystującego metodę objętości skończonych.*
- 3) *Opracowanie programu obliczeniowego w języku FORTRAN 77.*

- 4) *Przeprowadzenie analizy wpływu gęstości siatki objętości skończonych na wyniki obliczeń.*
- 5) *Przeprowadzenie analizy wpływu na wyniki obliczeń różnych korelacji na liczbę Nusselta.*
- 6) *Przeprowadzenie analizy wpływu na wyniki obliczeń przy rozwiązywaniu równań różniczkowych zachowania masy i pędu dla pary za pomocą metody różnic skończonych.*
- 7) *Przeprowadzenie weryfikacji dokładności obliczeń opracowanego modelu za pomocą analitycznego rozwiązania ścisłego oraz za pomocą symulacji CFD przeprowadzonej przy użyciu programu ANSYS.*
- 8) *Sprawdzenie wpływu wykorzystania różnych korelacji na współczynnik strat tarcia na wewnętrznej powierzchni rury.*
- 9) *Przeprowadzenie obliczeń przy założeniu, że zewnętrzna powierzchnia rurociągu jest zaizolowana cieplnie izolacją o różnej grubości.*
- 10) *Przeprowadzenie symulacji nagrzewania rurociągu przy różnych parametrach pary na jego wlocie.*
- 11) *Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego przewodzenia ciepła, w którym znany jest przebieg temperatury pary na wylocie z rurociągu, a poszukiwany jest przebieg czasowy temperatury pary na wlocie rurociągu.*

W rozdziale czwartym przedstawiona została metodyka wyznaczania dopuszczalnych szybkości nagrzewania dla elementów cylindrycznych oraz kulistych, bazująca na obowiązujących regulacjach kotłowych zawartych w normie PN-EN 12952-3 oraz w przepisach TRD 301. Dla wybranych elementów grubościennych kotła OP-380 zostały wyznaczone dopuszczalne szybkości nagrzewania dla rozruchów ze stanu zimnego, ciepłego i gorącego. Następnie dla tych elementów zostały wyznaczone zmiany temperatury i ciśnienia czynnika w czasie.

Charakterystyka rurociągu parowego została przedstawiona w rozdziale piątym. Przedstawione zostały jego główne wymiary geometryczne oraz parametry czynnika roboczego.

Przedmiotem rozdziału szóstego jest opis matematyczny procesu nagrzewania i ochładzania rurociągu. Procesy przepływowo-ciepłne zachodzące w rurociągu opisane

są z wykorzystaniem równań zachowania masy, pędu i energii dla czynnika roboczego oraz równania bilansu energii dla ścianki rurociągu. Wyżej wymienione równania zostały wyprowadzone dla jednowymiarowego nieustalonego przepływu czynnika w rurze, którego pole przekroju poprzecznego jest stałe oraz uwzględniając, że czynnik jest ściśliwy. Znaczne uproszczenia przyjęte przy wyprowadzaniu równań nie mają znacznego wpływu na dokładność modelowanych zjawisk.

Numeryczny model nieustalonej pracy rurociągu został przedstawiony w kolejnym, siódmym rozdziale. Bazując na wyprowadzonych równaniach zachowania energii, omówiono układ równań dla ścianki i czynnika z odpowiednimi warunkami początkowymi i brzegowymi. Dwuwymiarowe zagadnienie nieustalonego przewodzenia ciepła dla ścianki rurociągu rozwiązane zostało metodą objętości skończonej przy uwzględnieniu zależnych od temperatury właściwości materiałowych. Przyjęto, że temperatura ścianki rurociągu zmienia się w kierunku promieniowym jak i osiowym. Czasowy przebieg temperatury pary wzdłuż drogi jej przepływu wyznaczony został metodą różnic skończonych. Przedstawiono przykłady równań bilansowych dla objętości skończonej usytuowanej wewnątrz ścianki oraz dla objętości skończonej leżącej w obszarze pary.

W rozdziale ósmym zawarte są wyniki z przeprowadzonych testów i symulacji. W celu oceny dokładności modelu numerycznego opracowany został również matematyczny model analityczny. Porównane zostały wyniki otrzymane z rozwiązania analitycznego oraz z obliczeń bazujących na proponowanej metodzie numerycznej. Przeprowadzone zostały testy obliczeniowe przy różnym podziale rurociągu na objętości skończone. Na podstawie testów uzyskany został optymalny podział na n objętości skończonych w kierunku promieniowym oraz na M objętości w kierunku wzdłużnym, dla którego otrzymano wystarczającą dokładność obliczeń przy krótkim czasie obliczeń komputerowych. W kolejnym teście został sprawdzony wpływ użycia różnych zależności na współczynnik strat tarcia, który występuje w równaniu zachowania pędu.

W podrozdziale 8.1.2 został przedstawiony model numeryczny rurociągu parowego opracowany przy użyciu komercyjnego oprogramowania ANSYS CFX.

Kolejny podrozdział poświęcono rozważaniom nad słusznością założenia idealnie izolowanej ciepłnie zewnętrznej powierzchni rurociągu podczas jego modelowania. W tym celu został opracowany model numeryczny uwzględniający izolację cieplną na

zewewnętrznej powierzchni rurociągu. Rozważaniom zostało poddane kilka przypadków z różną grubością izolacji. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zostały porównane z wynikami uzyskanymi z rozwiązania analitycznego oraz z wynikami uzyskanymi z modelowania CFD.

W ostatnim podrozdziale rozdziału ósmego zostały przedstawione wyniki symulacji nagrzewania rurociągu wykorzystując opracowany model numeryczny. Symulacje zostały przeprowadzone dla czterech różnych zestawów danych: przebiegów zmian temperatury, ciśnienia i strumienia masy czynnika w czasie. W pierwszej symulacji wykorzystano liniową zmianę temperatury pary ze stałą szybkością $v_T=4\text{K}/\text{min}$. W drugim wariantcie nagrzewania rurociągu został zadany na wlocie do rurociągu przebieg zmian temperatury czynnika w czasie opracowany w rozdziale czwartym. Kolejne symulacje zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu rzeczywistych przebiegów zmian temperatury, ciśnienia i masy pary uzyskanych z pomiarów.

Przedmiotem rozdziału dziewiątego są zagadnienia odwrotne przewodzenia ciepła. Jako przykład zagadnienia odwrotnego przedstawiono wyznaczenie czasowego przebiegu temperatury pary na wlocie do rurociągu, przy którym otrzymany przebieg temperatury pary na wylocie z rurociągu będzie równy z góry zadanemu przebiegowi otrzymanego z pomiaru. Przeprowadzonych zostało kilka testów obliczeniowych dla różnych (założonych) przebiegów temperatury i ciśnienia na wylocie z rurociągu. Przedstawiono wyniki z rozwiązania zagadnienia odwrotnego przy wykorzystaniu rzeczywistych danych uzyskanych z pomiarów.

W podrozdziale 9.2, pokazano wykorzystanie zagadnienia odwrotnego do monitorowania dopuszczalnych szybkości nagrzewania i naprężeń cieplnych. W celu wyznaczenia dopuszczalnych szybkości nagrzewania oraz naprężeń występujących w ścianie elementu zostały wykorzystane dane pochodzące z pomiaru temperatury ścianki zlokalizowanego blisko powierzchni wewnętrznej elementu grubościennego. Przedstawione zostały obecnie wykorzystywane metody wyznaczania naprężeń na powierzchni wewnętrznej elementu oraz oszacowano rząd wielkości błędu uzyskanych wartości naprężeń przy jej wykorzystaniu. Zaproponowana została dokładniejsza metoda wyznaczania naprężeń cieplnych, wykorzystująca istniejące punkty pomiarowe, która jest pozbawiona wad obecnie stosowanych metod.

3. Ocena pracy

3.1. Główne osiągnięcia naukowe

Główny rurociąg parowy jest elementem krytycznym elektrowni/elektrociepłowni. Jest to element grubościenny i podczas eksploatacji należy kontrolować zmiany temperatury pary w czasie tak, aby nie przekraczać dopuszczalnych wartości naprężeń cieplnych wywołanych różnicą temperatury na grubości ścianki. Dotyczy to głównie etapów nagrzewania i ochładzania kiedy zmiany temperatury i ciśnienia czynnika roboczego mogą być duże.

Postępujący rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) i wzrastający ich udziału w produkcji energii elektrycznej skutkuje koniecznością szybkiego uruchomienia bloków konwencjonalnych. OZE charakteryzują się dużą zmiennością mocy w czasie, co przy braku magazynów energii elektrycznej powoduje konieczność pokrywania niedoborów mocy przez elektrownie konwencjonalne.

W pracy doktorskiej mgr inż. Karol Kaczmarek zajął się szczegółową analizą jednego z krytycznych elementów bloku energetycznego jakim jest główny rurociąg pary. Doktorant pokazał, że możliwe jest zwiększenie szybkości włączenia elektrowni do sieci dzięki zwiększeniu szybkości zmian temperatury i ciśnienia czynnika roboczego w czasie. Wskazuje przy tym na istotną rolę monitorowania parametrów pracy rurociągu ze szczególnym uwzględnieniem eksploatacji w warunkach nieustalonych, głównie podczas rozruchu i wyłączania kotła z ruchu.

W pracy zaproponowana została nowatorska metoda monitorowania pracy rurociągu z wykorzystaniem istniejących punktów pomiarowych. W elektrowniach w praktyce powszechnie wykorzystuje się pomiar na grubości rurociągu: głęboki (blisko powierzchni wewnętrznej) i w połowie grubości ścianki. Przyjmuje się dodatkowo założenie iż pomiar głęboki odpowiada temperaturze ścianki wewnętrznej rurociągu a pomiar w połowie grubości odpowiada średniej temperaturze w przekroju ścianki. Zmierzone wartości są wykorzystywane do obliczeń naprężeń występujących w

rurociągu. Doktorant w swojej rozprawie pokazał iż takie podejście nie jest prawidłowe i prowadzi do błędnego oszacowania naprężeń termicznych nawet powyżej 40%. Z tego powodu zaproponowana została metoda, która pozwala podnieść dokładność oszacowania naprężeń. Polega ona na pomiarze głębokim temperatury materiału rurociągu a następnie na rozwiązaniu problemu odwrotnego i wyznaczeniu temperatury powierzchni wewnętrznej rurociągu. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wskazano iż temperatura zmierzona w połowie grubości rurociągu nie odpowiada średniej temperaturze na przekroju. Średnia temperatura ścianki jest równa temperaturze ścianki w punkcie, którego położenie zależy od stosunku promienia zewnętrznego do wewnętrznego. Doktorant pokazuje że stosując zaproponowaną nową procedurę obliczeniową można zwiększyć dokładność wyznaczania naprężeń termicznych w rurociągu.

W pracy rozpatrywane są również zagadnienia związane z eksploatacją rurociągu parowego. Ważnym aspektem w eksploatacji bloku są parametry pary świeżej podawanej na turbinę. Parametry pary na drodze jej przepływu ulegają zmianie wskutek strat ciepła do otoczenia oraz strat ciśnienia pary spowodowanych tarciami i oporami miejscowymi. Poprzez rozwiązanie zagadnienia odwrotnego zaproponowana została procedura obliczeniowa do wyznaczania temperatury pary na wlocie do rurociągu, tj. na wylocie z kotła tak aby otrzymać żądane parametry pary na wlocie do turbiny. Poprawność opracowanej procedury sprawdzono poprzez porównanie temperatury wyznaczonej z rozwiązania zagadnienia odwrotnego z temperaturami pary zadanymi na wlocie do rurociągu. Stwierdzono bardzo dobrą zgodność zadanych i otrzymanych z rozwiązania zagadnienia odwrotnego czasowych przebiegów temperatury na wlocie do rurociągu.

W pracy przedawniono również opracowany numeryczny model własny pozwalający na analizę nieustalonego procesu nagrzewania rurociągu parowego. Numeryczny model 2D uwzględnia właściwości pary zależne od temperatury i ciśnienia.

Do osiągnięcia naukowego kandydata należy zaliczyć opracowany model, który został zwalidowany przez test obliczeniowy poprzez porównanie wyników z modelu własnego z rozwiązaniem ścisłym analitycznym. Model analityczny został zbudowany z wykorzystaniem metody superpozycji. Wyniki z modelu własnego porównano także z wynikami modelu 3D CFD otrzymując bardzo dobrą zgodność.

Kandydat zaprezentował pracę obejmującą zagadnienia zarówno przepływowe, cieplne jak i wytrzymałościowe, które towarzyszą nieustalanej eksploatacji głównego rurociągu parowego. Po sprawdzeniu, że zaproponowana metoda rozwiązania zagadnienia bezpośredniego daje dobrą zgodność z metodą analityczną oraz danymi pomiarowymi opracowana została metoda i program obliczeniowy do rozwiązania zagadnienia odwrotnego.

Metoda zapewnia bezpieczne nagrzewanie rurociągu bez przekraczania naprężeń dopuszczalnych.

3.2. Uwagi krytyczne

1. Dlaczego przedmiotem rozprawy jest rurociąg parowy skoro w kotle jest dużo więcej elementów które mogą ograniczać rozruch?
2. Dlaczego rozpatrywany jest rurociąg parowy tj. element cylindryczny o prostych kształtach; w jaki sposób można uogólnić wyniki na trójniki, zawory, i inne elementy rurociągu o złożonych kształtach?
3. W podrozdziale 8.1.2. *Modelowanie CFD zjawisk przepływowo cieplnych w rurociągu parowym*, przedstawiono analizę numeryczną procesów przy wykorzystaniu komercyjnego kody ANSYS CFX.
 - Dlaczego w analizach posłużono się modelem turbulentnym $k-\epsilon$?
 - Czy przeprowadzono analizę wpływu jakości siatki numerycznej na wyniki symulacji?
 - Interesujące byłoby porównanie współczynnika wnikania ciepła wyliczonego w programie ANSYS CFX ze współczynnikiem wyliczonym przy wykorzystaniu korelacji na liczbę Nusselt'a.

3.3. Uwagi edytorskie

W tekście występują nieliczne błędy edytorskie

- str. 5: „ k_e – energię kinetyczną turbulencji” powinno być „ k_e – energia kinetyczna turbulencji”;

- str. 5: „ r_s – lokalizację czujnika temperatury” powinno być „ r_s – lokalizacja czujnika temperatury”;
- str. 11: „na wewnętrznej powierzchnia elementu” powinno być „na wewnętrznej powierzchni elementu”;
- str. 13 , pkt 2: „elementów krytyczny,, powinno być: „elementów krytycznych”;
- str. 14: „komercyjnego pakiet obliczeniowego” powinno być: „komercyjnego pakietu obliczeniowego”;
- str. 33: „elementami kryterialnymi decydującym” powinno być: „elementami kryterialnymi decydującymi”;
- str. 53: „Gnielińskiego” powinno być „Gnielinskiego”;
- str. 66: „przedstawiono została na rysunku” powinno być: „przedstawiona została na rysunku”;
- str. 66: „zostały przedstawiono zmiany” powinno być: „zostały przedstawione zmiany”;
- str. 105: „do wyznaczenia przebiegu czasowego temperatury pary na wlocie do rurociągu $T_{cz}(t)|_{z=0}$, przy której przebieg temperatury „powinno być „do wyznaczenia przebiegu czasowego temperatury pary na wlocie do rurociągu $T_{cz}(t)|_{z=0}$, przy którym przebieg temperatury;
- str.133: „Gnieliński” powinno być „Gnielinski”.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej opinie uwzględniające wybór tematu rozprawy, sposób jego analizowania, osiągnięte wyniki i zastosowane metody badawcze oraz ilość publikacji w renomowanych czasopismach z listy filadelfijskiej, stwierdzam, że Pan mgr inż. Karol Kaczmarek wykazał, że jest naukowcem dojrzałym, potrafiącym w swojej pracy wykorzystywać formułować i rozwiązywać problemy badawcze, umiejącym wyciągać wnioski z otrzymanych wyników. Stwierdzam także, że posiadana wiedza oraz umiejętności pozwalają Mu na prowadzenie badań w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie energetyka, dlatego też spełnia warunki do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych.

Wnoszę, zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14. 03. 2003 r., o dopuszczenie Go do obrony pracy i nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

Także po wnikliwej analizie pracy oraz przestudiowaniu zakresu zrealizowanych badań jak i publikacji, jakie ukazały się m. in. w renomowanych czasopismach z listy filadelfijskiej (lista A MNiSW) (10 publikacje), na recenzowanych konferencjach notowanych na Web of Science (8 artykuły) oraz w czasopismach z listy B MNiSW (4 publikacje) uważam, że dysertacja Pana mgr inż. Karola Kaczmarskiego zasługuje na wyróżnienie.

PRODZIEKAN
ds. Nauki i Współpracy z Zagranicą
dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz, prof. nadzw.
(1)

Dr hab. inż. Sławomir PIETROWICZ, prof. uczelni