

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Barbary Janowskiej**  
**pt. „Badania ciepłno-przepływowe śrubowej chłodnicy popiołu dennego kotła**  
**fluidalnego”**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej są badania ciepłno-przepływowe oraz modelowanie matematyczne chłodnic ślimakowych popiołu dennego z kotła fluidalnego. Badane były dwa typy chłodnic: chłodnica podwójna składająca się z dwóch symetrycznych cylindrów chłodzonych wewnątrz przepływającą wodą oraz chłodnica pojedyncza z jednym chłodzonym cylindrem. Na zewnętrznej powierzchni cylindrów znajdują się spiralne (śrubowe) żebra. Cylindry otoczone są płaszczem wodnym. Przez kanał pierścieniowy utworzony przez wewnętrzny obracający się cylinder oraz wewnętrzną ścianę płaszcza wodnego jest transportowany i jednocześnie chłodzony popiół denny. Optymalizacja pracy chłodnicy popiołu jest ważna ze względu na konieczność utrzymywania temperatury schłodzonego popiołu na poziomie 260°C, jak również ze względu na możliwości wykorzystania ciepła podgrzanej wody chłodzącej do celów grzewczych lub technologicznych. Obecnie woda podgrzana w chłodnicach popiołu przepływa do chłodni kominowych, gdzie ulega schłodzeniu a ciepło w niej zawarte odprowadzane jest bezużytecznie do otoczenia. Podniesienie temperatury wylotowej wody chłodzącej umożliwiłoby wykorzystanie jej, np. do celów grzewczych lub do przygotowania ciepłej wody użytkowej.

Tematyka pracy jest aktualna i może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej.

### **1. Charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Barbary Janowskiej o objętości 110 stron składa się z ośmiu rozdziałów, spisu oznaczeń oraz spisu literatury cytowanej zawierającego 96 pozycji literaturowych.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi krótkie wprowadzenie, w którym Kandydatka opisuje kotły fluidalne stosowane w polskim systemie energetycznym oraz problemy związane z chłodzeniem popiołów dennych w kotłach fluidalnych.

W krótkim rozdziale drugim przedstawiony jest cel i zakres pracy, który obejmował przegląd rodzajów chłodnic popiołu dennego w kotłach fluidalnych, badania ciepłno-przepływowe pojedynczych i podwójnych chłodnic popiołu w Elektrowni Turów, budowę stanowiska laboratoryjnego i wyznaczanie współczynnika przewodzenia ciepła popiołu dennego, opracowanie modelu matematycznego pojedynczej śrubowej chłodnicy popiołu oraz eksperymentalną weryfikację tego modelu na obiekcie rzeczywistym.

W rozdziale trzecim sformułowana została następująca teza „Badania cieplno-przepływowe wraz z matematycznym modelem pracy śrubowej chłodnicy popiołu pozwalają na optymalizację pracy urządzenia przy zachowaniu technologicznej temperatury odprowadzanego popiołu i możliwie najwyższej temperatury wody chłodzącej na wyjściu z chłodnicy w celu wykorzystania ciepła odpadowego z wody chłodzącej, a tym samym możliwości zwiększenia sprawności bloku”.

W rozdziale czwartym omówione zostały chłodnice popiołu dennego w kotłach fluidalnych. Po krótkiej charakterystyce kotła fluidalnego z cyklonem oraz kompaktowego kotła fluidalnego przedstawione zostały cztery następujące rodzaje chłodnic popiołu dennego: chłodnice fluidalne, chłodnice chłodzone powietrzem, chłodnice bębnowe oraz chłodnice śrubowe. Przegląd prac poświęconych modelowaniu matematycznemu chłodnic popiołu zawiera paragraf 4.3.

Wyniki własnych pomiarów na obiekcie rzeczywistym przedstawione są w rozdziale piątym. Jest to najobszerniejszy rozdział w całej rozprawie. Mierzone były temperatury wlotowe i wylotowe wody przepływającej przez rurę centralną z żebrami spiralnymi i płaszcz zewnętrzny oraz temperatury popiołu na wlocie i wylocie z chłodnicy. Mierzone były również objętościowe strumienie wody chłodzącej przepływającej przez chłodnicę. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczone zostały strumienie ciepła przejmowane przez wodę chłodzącą przepływającą przez rurę centralną oraz płaszcz zewnętrzny. Pomiarzy przeprowadzone zostały w Elektrowni Turów na dwóch dwuśrubowych oraz na dwóch jednośrubowych chłodnicach popiołu. Do pojedynczych chłodnic popiołu podawany był popiół usuwany okresowo z przegrzewaczy pary typu intreks, usytuowanych w dolnej części kotła fluidalnego. Badania przeprowadzono przy otwartym i zamkniętym przewodzie doprowadzającym popiół z wymiennika typu intreks. Pomiarzy przepływowo-ciepłne chłodnic popiołu przeprowadzone zostały przy różnych obciążeniach kotłów fluidalnych i chłodnic. Obciążenie chłodnicy, stanowiące aktualny procent maksymalnej prędkości obrotowej śruby, zmieniało się w przedziale od 20% do 80% z krokiem równym 20%. Wyznaczone zostały niepewności obliczanych na podstawie pomiarów strumieni cieplnych przekazywanych od popiołu do wody. Do obliczania niepewności wielkości wyznaczanych pośrednio zastosowane zostało prawo propagacji wariancji sformułowane przez Gaussa.

Eksperymentalne wyznaczanie współczynnika przewodzenia ciepła popiołu dennego omówione zostało w rozdziale szóstym. Do wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła popiołu powstającego przy spalaniu węgla brunatnego zbudowane zostało stanowisko badawcze umożliwiające pomiary w szerokim zakresie zmian temperatury popiołu. Współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczany był z równania Fouriera. Pole temperatury w badanej próbce było jednowymiarowe. Gradient temperatury w próbce wyznaczany był na podstawie pomiaru temperatury próbki w dwóch punktach usytuowanych na różnych wysokościach. Gęstość strumienia ciepła przepływającego przez próbkę wyznaczana była na podstawie pomiaru mocy grzewczej mierzonej watomierzem. Wyznaczone zostały niepewności otrzymanych współczynników przewodzenia ciepła.

W rozdziale siódmym przedstawiony zostały model matematyczny pojedynczej chłodnicy popiołu. Bazując na metodzie objętości skończonej (metodzie bilansów elementarnych) opracowany został model matematyczny umożliwiający wyznaczenie rozkładu temperatury wody w rurze śrubowej i płaszczu zewnętrznym oraz temperatury popiołu na długości

chłodnicy. Metoda jest jawna, gdyż ciepła właściwe wody i popiołu obliczane są w temperaturze wlotowej do obszaru kontrolnego. Stanowi to zaletę metody, gdyż nie wymaga ona iteracji. Współczynniki przenikania ciepła dla ścianek cylindrycznych obliczane były tak jak dla ścianek płaskich. Współczynniki wnikania ciepła po stronie wody i powietrza obliczane były za pomocą korelacji dostępnych w literaturze. W paragrafie 7.6 porównane zostały wyniki obliczeń temperatur wylotowych wody i popiołu z wynikami pomiarów. Porównanie przeprowadzone zostało dla różnych prędkości obrotowych śruby (rury centralnej zebrami spiralnymi).

Wnioski końcowe zawiera rozdział ósmy.

## 2. Główne osiągnięcia naukowe przedstawione w rozprawie

Rozprawa doktorska mgr inż. Barbary Janowskiej ma charakter obliczeniowo-eksperymentalny i wymagała przeprowadzenia pracochłonnych badań eksperymentalnych, zarówno na obiekcie rzeczywistym, jak i w laboratorium.

Do oryginalnych osiągnięć mgr inż. Barbary Janowskiej należy eksperymentalne wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła popiołu dennego w funkcji temperatury. Oceniona została również niepewność otrzymanych wartości współczynników przewodzenia ciepła, które były wyznaczane pośrednio.

Wysoko należy również ocenić badania eksperymentalne rzeczywistej chłodnicy popiołu dennego przeprowadzone w elektrowni z wykorzystaniem przyrządów pomiarowych o dużej dokładności. Oceniona została również niepewność wyznaczania strumienia ciepła przejmowanego przez wodę chłodzącą.

Do istotnych osiągnięć naukowych Kandydatki zaliczyłbym opracowanie modelu matematycznego wymiany ciepła w chłodnicy popiołu. Model matematyczny chłodnicy bazuje na metodzie objętości skończonej. Równanie bilansu ciepła (7.21) zapisane zostało dla objętości kontrolnej w kanale pierścieniowym, przez który przepływa popiół. Równanie bilansu ciepła (7.22) zapisane jest dla wody przepływającej przez rurę centralną, a równanie (7.23) dla wody przepływającej przez kanał pierścieniowy (płaszcz chłodzący popiół). Pomimo drobnych usterek w wymienionych równaniach bilansowych, wyszczególnionych w uwagach krytycznych, zaproponowana metoda umożliwia łatwe wyznaczenie temperatury wody w rurze centralnej i płaszczu zewnętrznym oraz temperatury popiołu na długości chłodnicy. Zaproponowana metoda nie wymaga podziału chłodnicy na dużą liczbę objętości skończonych (komórek), a obliczenia można przeprowadzić za pomocą programu Mathcad lub Excel.

## 3. Uwagi krytyczne

- Przedmiotem rozdziału szóstego jest eksperymentalne wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła popiołu dennego. Współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczano z prawa Fouriera na podstawie znanej gęstości strumienia ciepła przepływającego przez warstwę popiołu oraz mierzonej różnicy temperatury w dwóch różnych punktach na wysokości warstwy popiołu. Nie jest jasne w jaki sposób obliczano gęstość strumienia ciepła od płyty grzejnej do warstwy popiołu. Wyznaczanie gęstości strumienia ciepła na podstawie mocy grzewczej doprowadzanej do płyty może być obarczone dużym błędem

z uwagi na duże straty ciepła z układu grzejnego płyty do otoczenia. Aby dokładniej wyznaczyć strumień ciepła przejmowany przez popiół od płyty grzejnej należałoby zmierzyć gęstość strumienia ciepła na powierzchni płyty grzejnej, np. poprzez pomiar temperatury płyty grzejnej w różnej odległości od powierzchni płyty stykającej się z popiołem. Znając współczynnik przewodzenia ciepła materiału płyty grzejnej oraz współrzędne czujników do pomiaru temperatury płyty grzejnej można by dokładniej wyznaczyć gęstość strumienia ciepła wnikającego od płyty grzejnej do popiołu. Obliczanie gęstości strumienia ciepła na podstawie mocy grzewczej płyty może skutkować zawyżonymi wartościami współczynnika przewodzenia ciepła popiołu, gdyż nie uwzględniane są straty ciepła od elementów grzejnych oraz płyty do otoczenia. Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła ciał sypkich jest bardzo trudny. W przyszłości dobrze byłoby zmierzyć współczynnik przewodzenia ciepła inną metodą, np. bazującą na różnicy temperatury w warstwie popiołu wywołaną działaniem liniowego źródła ciepła. Porównanie współczynników przewodzenia ciepła popiołu wyznaczonych różnymi metodami pozwoli na uzyskanie wiarygodnych wyników.

- Autorka powołując się na pracę [91], wprowadza pojęcie współczynnika wnikania ciepła  $\alpha_{st}$  dla stalowych ścian śruby i płaszczu, który obliczany jest ze wzoru

$$\alpha_{st} = \frac{\lambda_s}{R_o \ln \left( \frac{R_o}{R_i} \right)}$$

Symbol  $\alpha_{st}$  oznacza odwrotność oporu cieplnego ścianki cylindrycznej odniesionego do jej zewnętrznej powierzchni i niecelowe jest wprowadzanie nowego nazewnictwa, tym bardziej, że współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  dotyczy konwekcyjnej wymiany ciepła. Ponadto, odwrotność  $\alpha_{st}$  jest oporem cieplnym ścianki odniesionym do zewnętrznej powierzchni rury. Z analizy wzorów (7.19) i (7.20) wynika, że przy obliczaniu współczynników przenikania ciepła, ścianki cylindryczne traktowane były jako ścianki płaskie. W konsekwencji, lepiej było obliczać opór cieplny stalowej ścianki ze wzoru  $r_{st} = 1/\alpha_{st} = (R_o - R_i)/\lambda_s$ , tj. tak jak dla ścianki płaskiej.

- Do obliczania współczynnika wnikania ciepła po stronie wody stosowany jest wzór Gnielinskiego (7.11). Jest to wzór ważny dla liczb Reynoldsa większych od 4 000. Z tabeli 7.3 wynika, że liczba Reynoldsa dla przepływu wody w płaszczu była dla temperatur 20, 30 i 40°C była mniejsza od 4 000. Stosując wzór Gnielinskiego (7.11) dla liczb Reynoldsa mniejszych od 4 000 otrzymuje się zawyżone wartości współczynnika wnikania ciepła. Można było zastosować do obliczania liczby Nusselta wzór podany w pracy [94], przyjmując w zakresie przepływu laminarnego stałą temperaturę ścianki, jak dla wymienników współprądowych. Ponadto nie podane zostały zakresy liczb Reynoldsa Prandla, dla których ważne są korelacje (7.11) i (7.12).
- Przy obliczaniu współczynnika wnikania ciepła od strony popiołu dla rury centralnej należało uwzględnić obecność żeber spiralnych. Z uwagi na znaczne pole powierzchni ślimaka po stronie popiołu można było uwzględnić obecność żeber na powierzchni rury centralnej, wprowadzając zredukowany współczynnik wnikania ciepła. Dzięki uwzględnieniu powierzchni ślimaka jako powierzchni żeber, zredukowany współczynnik

wnikania ciepła, odniesiony do zewnętrznej powierzchni rury centralnej, byłby większy od współczynnika wnikania ciepła po stronie popiołu.

- We wzorach (5.1) i (5.2) używa się oznaczeń  $\dot{Q}_p$  i  $\dot{Q}_s$  dla strumienia ciepła przejmowanego w chłodnicy przez przepływającą wodę, odpowiednio w płaszczu i śrubie. Takie same oznaczenia stosuje się we wzorach (7.17), (7.18), (7.21), (7.22) i (7.23). W tych ostatnich wzorach lepiej byłoby przyjąć odpowiednio oznaczenia  $\Delta\dot{Q}_p$  i  $\Delta\dot{Q}_s$ , gdyż są to strumienie ciepła przekazywane przez powierzchnię rury o długości  $dx$ . We wzorach (7.21), (7.22) i (7.23) zamiast  $dx$  powinno być  $\Delta x$ , gdyż zmianę temperatury wody i popiołu wyznacza się na skończonej długości  $\Delta x$ .
- Na stronie 95 rozprawy Kandydatka pisze "Gęstość i ciepło właściwe wody są każdorazowo obliczane dla danego położenia i lokalnej temperatury odpowiednio w śrubie i płaszczu". Uwzględniając, że rozpatruje się stan ustalony wymiennika to strumienie masy wody i popiołu są stałe na całej długości wymiennika. We wzorach (7.21)-(7.23) strumienie objętości powinny byćbrane z pomiaru, a gęstość danego czynnika powinna być obliczana dla temperatur mierzonych w punktach pomiaru strumienia objętości. We wzorach (7.21)-(7.23) należy więc uwzględnić tylko zależność ciepła właściwego od temperatury i ewentualnie od położenia.
- Na stronie 23 zamiast „Średnia projektowa prędkość” powinno być „Średni projektowy strumień objętości”.
- W tytule tablicy (7.4) powinno być „z formuł (7.11) i (7.12)” zamiast „z formuł (7.22) i (7.23)”.
- Na stronie 92 we wzorze (7.13) zamiast  $k$  powinno chyba być  $c$ , gdyż Autorka rozprawy pisze „W równaniu (7.13) występuje parametr  $c$ ”.

Wyszczególnione uwagi mają charakter porządkowy, głównie ze względu na teorię wymiany ciepła. Uwzględnienie wyżej wymienionych uwag krytycznych ma niewielki wpływ na uzyskane wyniki modelowania matematycznego analizowanej chłodnicy popiołu dennego.

#### 4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Barbary Janowskiej spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Rozprawa doktorska ma duże znaczenie praktyczne. Wyniki uzyskane w pracy mogą być wykorzystane do optymalizacji pracy chłodnic popiołu i poprzez odzysk ciepła schładzania popiołu mogą przyczynić się do poprawy sprawności bloku energetycznego. Z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Barbary Janowskiej do publicznej obrony swojej pracy.

J. Taler