Szczecin, 03.09.2015 r.

Prof. dr hab. inż. Sergiy Filin
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Techniki Morskiej i Transportu
Katedra Klimatyzacji i Transportu Chłodniczego

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Tuchowskiego pt.: „Badania eksperymentalne efektywności pompy ciepła wykorzystującej utajone ciepło zamarzania wody"

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Techniki Morskiej i Transportu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie Pana dr hab. inż. Macieja Taczały, prof. ZUT z dnia 6 czerwca 2015 r.

Recenzowana rozprawa doktorska napisana pod promotorstwem prof. dr hab. inż. Bogusława Zakrzewskiego zawiera wykaz najważniejszych oznaczeń, wstęp, 6 rozdziałów, podsumowanie i wnioski, literaturę i załączniki; całość stanowi 215 stron tekstu; cześć podstawowa - 176 stron, natomiast załączniki - 40 stron.

1. Aktualność podjętego tematu

Poprawą efektywności energetycznej maszyn i urządzeń technicznych o różnym przeznaczeniu stała się prawdziwym wyzwaniem gospodarki światowej w XXI wieku, głównym trendem badań naukowych i prac rozwojowych. W tym trendzie mieszczą się urządzenia chłodnicze, klimatyzacyjne i pompy ciepła. Podniesienie poziomu życia z jednej strony i ocieplenie klimatu Ziemi z innej strony – to są dwa główne czynniki, które powodują przyspieszony rozwój branży klimatyzacyjnej i tak samo szybki wzrost liczebności klimatyzatorów i pomp ciepła. Wzrost zastosowań pomp ciepła w Polsce i na świecie jest związany ze stałym postępem w poprawie ich efektywności oraz z zaliczeniem przez władze unijne niektórych pomp ciepła do obszaru tzw. *odnawialnych źródeł energii* (OZE). Innym popularnym obecnie hasłem jest promowaną w UE gospodarką niskoemisyjną. Walka o poprawę efektywności pomp ciepła nie będzie skuteczna bez zastosowania nowych podejść i

innowacyjnych rozwiązań technicznych. Biorąc pod uwagę w/w założenia, zarówno pod względem postawionych zadań, jak i pod względem wybranych środków ich rozwiązania (weryfikacja eksperymentalna wynalazku i opracowanie nowych rozwiązań) temat rozprawy jest aktualny, a sama praca ma aplikacyjny charakter.

2. Przedmiot i treść rozprawy

We wstępie Autor podaje historię rozwoju pomp ciepła, obszar ich zastosowań prezentuje główne zagadnienia pracy doktorskiej. Zwraca uwagę na nowość idei wykorzystania ciepła krzepnięcia wody do zasilania dolnego źródła pompy ciepła. Podkreśla też charakter eksperymentalny badań na obiekcie rzeczywistym wodnej pompy ciepła.

W rozdziale pierwszym autor omawia dynamikę rozpowszechniania się sprężarkowych pomp ciepła w Polsce i w UE w latach 2005-2013 i ich strukturę z przedstawieniem udziałów w zależności od wykorzystywanych zasobów otoczenia (powietrzne, gruntowe, wodne). Podkreślana jest wysoka efektywność COP wodnych pomp ciepła. Analizowane są wytyczne Komisji UE z 1 marca 2013r. dotyczące sposobu obliczeń energii odnawialnej z pomp ciepła w odniesieniu do różnych technologii pomp ciepła. Podkreśla się, że ich efektywność COP powinna przekraczać 2,5, aby je uznać w części za energię odnawialną.

W rozdziale drugim (podrozdział 2.1) zestawiono wybrane badania wodnych i powietrznych pomp ciepła. Jednakże wyniki tego przeglądu dotyczą temperatury wody powyżej 15°C. Z przytoczonych obliczeń wynika, że zużycie energii dla powietrznych pomp ciepła jest wyższe o 28% od wodnych. W dalszej części przeglądu są ukazane nowe substancje zastosowane w pompach ciepła, np. mieszaniny R152a/R245fa lub R32/R152a wykazały szereg korzyści ich stosowania: w lewobieżnych obiegach termodynamicznych pomp ciepła zmalała pobierana moc i wzrosła efektywność COP w porównaniu do czynnika R22.

W kolejnej części rozdziału Autor ukazuje badania nad możliwością wykorzystania ciepła ze ścieków komunalnych i przemysłowych, co z resztą słabo wiąże się z tematem pracy.

Przegląd rozwiązań kończy opis rozwiązania wodnej pompy ciepła wykorzystującej ciepło krzepnięcia wody przy niskich temperaturach zewnętrznych.

Podrozdział 2.2 zawiera podstawy teoretyczne pomp ciepła, w tym przedstawiono obieg Carnota, obiegi teoretyczne, obieg z regeneracją ciepła oraz obieg z regeneracją dla roztworu czynnik chłodniczy - olej smarny. W ramach analiz obiegów pomp ciepła wykonanych dla szeregu czynników chłodniczych wykazano zalety obiegu z regeneracją ciepła, które występują tylko dla niektórych czynników. Wspomniane zalety są charakterystyczne dla pomp ciepła i przy

uwzględnieniu obecności oleju w instalacji. Ich objawem jest wzrost mocy grzewczej i efektywności COP.

W końcowej części podrozdziału przedstawiono pomiary koncentracji oleju w roztworze olej –R404A uzyskane na stanowisku pomiarowym pompy ciepła. Jak wykazały pomiary, koncentracja oleju w roztworze wynosi około 0,8 %, co świadczy pozytywnie o pracy odolejacza.

W rozdziale 3 przedstawiono wstępne wyniki badań eksperymentalnych pompy ciepła na stanowisku modelowym oraz szczegółowo opisano podstawowe stanowisko badawcze, obiekt badań i metodyka badań.

Jako wielkości wejściowe wprowadzono: temperaturę par czynnika na ssaniu, czas trwania cyklu pracy, różnicę temperatur wody w basenie i temperatury parowania, a jako wielkości wyjściowe mierzono: zużycie energii podczas pracy, a ilość produkowanego ciepła wyznaczono z pomiarów pośrednich: strumienia wody chłodzącej skraplacz, oraz różnicy temperatur wody. Wielkość COP wyznaczono na podstawie bezpośrednich pomiarów zużycia energii i pośrednich ilości ciepła. Na końcu rozdziału omówione zostały niepewności pomiarowe typu A i B.

Rozdział 4 zawiera cel i tezy pracy, które można było umieścić nieco wcześniej.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych pompy ciepła w całym zakresie temperatur wody, to jest od temperatury wody w basenie 3-4 °C do 22°C. W pracy również zostały zawarte wyniki obserwacji zmian temperatur wody i powietrza w latach 2013 – 2014 i ich analiza.

Przeprowadzono badania efektywności COP pompy ciepła w okresie letnim przy temperaturze wody od 10°C do 18°C. Uzyskane rezultaty pomiarów zostały opracowane statystycznie i uzyskane wartości współczynnika determinacji R^2 wskazały na dobre dopasowanie modelu do danych, model regresji uwzględniający zmienną niezależną jaką jest temperatura wody pozwala na 90% wyjaśnienie wariancji zmiennej COP.

Do analizy wyników zastosowano program *Statistica*. Wyniki oceny statystycznej istotności współczynników i adekwatności otrzymanych równań zestawiono w tabelach i na rysunkach; obrazują one zależność COP od wielkości różnicy temperatur (w pracy przyjęto 3 wartości różnicy temperatur wody i parowania czynnika (ΔT =10, 8, 6K). Wykazały one oczekiwaną prawidłowość: wzrost COP z rosnącą temperaturą wody w basenie i z malejącą różnicą temperatur wody i parowania czynnika. Wyniki analizy wykazały też dobre dopasowanie linii regresji do rzeczywistych danych pomiarowych.

Rozdział 6 zawiera analizę wybranych środowiskowych i ekonomicznych aspektów stosowania wodnych pomp ciepła. Tu można mieć zastrzeżenie, co do wyboru bazy porównania przy ocenie całkowitych kosztów zakupu i eksploatacji pompy ciepła.

Pracę kończy podsumowanie i dość szczegółowe wnioski. Jak z nich wynika, można znacząco ograniczyć zużycie energii elektrycznej zużywanej na prace pomp ciepła wprowadzając szerzej wodne pompy ciepła szczególnie tam gdzie występują zbiorniki wodne lub rzeki, ostatecznie można budować sztuczne zbiorniki. Powstają nowe rozwiązania i będą stosowane nowe czynniki chłodnicze prowadzące do redukcji emisji CO_2 w atmosferze.

W pracy zamieszczone zostały też proponowane przez Autora kierunki dalszych badań w wybranej tematyce.

III. Ocena merytoryczna i uwagi ogólne

Największym osiągnięciem naukowym Autora jest udowodnienie możliwości efektywnej pracy pompy ciepła przy niskich temperaturach wody (dolnego źródła ciepła) w warunkach oblodzenia parowników, a w części aplikacyjnej – opracowanie i przebadanie niezakłóconych trybów pracy pompy ciepła przy samoczynnym uwolnieniu powierzchni parownika od warstwy lodu.

W pracy od początku był postawiony bardzo ambitny cel i zaplanowano dość szeroki zakres badań. W rezultacie cel podstawowy, a mianowicie udowodnienie możliwości praktycznej realizacji pomysłu wg patentu nr 209839, określenie zakresu możliwych warunków eksploatacji i udowodnienie możliwości ociągnięcia wysokich wartości COP został osiągnięty. Co do zakresu samych badań został on z przyczyn obiektywnych nieco okrojony, więc poziom oczekiwań (szczególnie w części eksperymentalnego przebadania wpływu regeneracji ciepła oraz obecności oleju w instalacji) był wyższy od uzyskanych wyników. W tej sytuacji należałoby skorygować cele i tezy pracy zgodnie z jej wynikami. Wybór niezależnych zmiennych też można byłoby skorygować na podstawie wyników badań wstępnych.

Druga teza, przy najmniej w jej pierwszej części jest oczywista.

Niestety, Autor nie odniósł się do znanych rozwiązań pomp ciepła z jednoczesnym wytwarzaniem lodu, np. patent USA nr 4187690 *Ice-maker heat pump* oraz wyników badań podobnych urządzeń. Brak analizy porównawczej nie pozwala obiektywnie ocenić skalę nowości proponowanego w pracy rozwiązania pompy ciepła (światowa, europejska, czy krajowa).

Pierwsza cześć wniosku 7 dotycząca celowości stosowania regeneracji ciepła nie została w pracy w pełni udowodniona.

Wniosek 9 jest trywialny i wynika z powszechnie znanych zależności teoretycznych.

Praca jest zbyt obszerna, zawiera sporo informacji i elementów bezpośrednio nie związanych z tematem, aczkolwiek intencje Autora są zrozumiałe, gdyż chodziło mu o lepsze uzasadnienie istotności tematu. Natomiast powtórki fragmentów tekstu, liczne niedokładności i uchybienia stylistyczne, ortograficzne, w tym tzw. „literówki", wskazują na niechlujność Autora w redagowaniu rozprawy i istotnie psują ogólnie dobre wrażenie od wykonanej przez niego pracy.

IV. Wybrane uwagi szczegółowe

1. Ma miejsce niespójność a nawet sprzeczność używanej terminologii: raz Autor używa pojęcia „dochładzacz", w innym miejscu – „dozięblacz", tak samo „czynnik" – „ziębnik", straty mocy napędowej ε_{cn} (str. 49) i efektywność obiegu porównywanego ε_{cn} (str. 50) itp.
2. Treść podpisu rysunku 2.22 na str. 44 nie odpowiada zawartości rysunku.
3. Nie wyjaśniono kolejność działania wężownic na rys. 2.24.
4. Nadal jest dyskusyjny status „odkrycia" Rowlanda i Moliny odnośnie przyczyn uszczuplenia warstwy ozonowej (czy jest to teoria, czy tylko hipoteza) - str. 51.
5. Brak źródeł literaturowych 13 i 14 na str. 52.
6. Budzi wątpliwość słuszność pojawienia się ostatniej składowej we wzorze 2.9.
7. Słabo uzasadniono punkty pomiaru stężenia oleju (rys. 2.49). Brak związku tych punktów z obliczeniami (np. wzór 2.12).
8. Bardzo skąpa analiza wpływu ΔT na COP i inne parametry obiektu (str. 135-141).
9. Brak uzasadnienie wyboru zakresu zmienności t_{ss}.
10. Budzi wątpliwość słuszność linearyzacji zależności COP od t_w (rys.5.15) w tak szerokim zakresie zmiany temperatury wody. Załamanie tej zależności w okolicach t_w=10°C wskazuje na celowość podziału tego zakresu na dwa: z oblodzeniem powierzchni parowacza i bez oblodzenia.
11. Dane z tabeli 5.8 to nie są wyniki pomiarów, jak twierdzi Autor na str. 130.
12. Str. 140. Jeśli proces oblodzenia powierzchni parowacza zależy od temperatury wody, powietrza itp. nie można go nazywać procesem chaotycznym.
13. Niepoprawny odsyłacz na źródło [64] na str. 150.
14. W poz. 30 wykazu literatury pomyłkowo został podany numer zgłoszenia w zamian numeru patentu.

V. Podsumowanie

Przedstawiona przez mgr inż. Wojciecha Tuchowskiego praca stanowi wykonane przez niego samodzielne i oryginalne opracowanie, które polega na rozwiązaniu naukowego zagadnienia związanego z eksploatacją wodnych pomp ciepła w warunkach oblodzenia parowacza. Doceniając duży wysiłek Autora w przygotowanie i przeprowadzenie badań eksperymentalnych i dostrzegając umiejętność obróbki i interpretacji uzyskanych danych, można stwierdzić, iż Autor pracy jest przygotowany do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie „Budowa i eksploatacja maszyn", dysponuje wystarczająco dużą ogólną wiedzą teoretyczną oraz umiejętnościami praktycznymi w tej dyscyplinie.

W konkluzji stwierdzam, że mimo zgłoszonych uwag recenzowana praca spełnia wymagania Ustawy z dnia 14.03.2003 o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.