



Kraków, 24.07.2015

prof. dr hab. inż. Jacek Schnotale

Opinia o pracy doktorskiej Pana mgra inż. Wojciecha Tuchowskiego
z tytułowanej
„Badania eksperymentalne efektywności pompy ciepła wykorzystującej utajone
ciepło zamarzania wody”

Opinię opracowano na podstawie pisma Pana dr hab. inż. Macieja Taczała, prof. ZUT
Dziekana Wydziału Techniki Morskiej i Transportu z dnia 06.06.2015

Zawartość opiniowanej pracy

Praca doktorska, której promotorem jest Prof. dr hab. inż. Bogusław Zakrzewski, składa się z sześciu rozdziałów wraz ze spisem literatury i pięcioma załącznikami w sumie zawierając 215 stron druku. W rozdziale 4, poprzedzonym bardzo obszernym wstępem wprowadzającym do tematyki rozprawy doktorskiej, sformułowano wyczerpująco cel, tezy i zakres pracy.

Tematem rozprawy jest rozwiązanie problemu naukowego optymalizacji konstrukcji i funkcjonowania pompy ciepła, w której dolnym źródłem ciepła jest woda, która w warunkach niskich temperatur może cyklicznie zamarzać na powierzchni płytowego parowacza. System ten został opracowany i opatentowany przez promotora pracy doktorskiej Pan Prof. dr hab. inż. Bogusława Zakrzewskiego. Zaproponowany system jest bardzo nowatorski w swojej koncepcji i w istotny sposób poszerza możliwość stosowania pomp ciepła z wykorzystaniem wody jako dolnego źródła ciepła zwłaszcza w sytuacji gdy woda ta ma niską temperaturę. System jest wyposażony w dwa wymienniki ciepła funkcjonujące rewersyjnie jako parowacz lub dochładzacz. System taki umożliwiłoby pozyskiwanie utajonego ciepła krzepnięcia wody wymrażanej na powierzchni parowacza. Po przełączeniu systemu parowacz funkcjonuje jako dochładzacz mający odłodzić wymiennik ciepła dzięki ciepłu dostarczanemu z cieczy ziębnika odpływającej ze skraplacza. Realizowane w ten sposób dochłodzenie poprawia efektywność realizacji obiegu pompy ciepła. Zaproponowany układ zmniejsza sezonowe zapotrzebowanie energii do napędu pompy ciepła, gdyż umożliwia nieprzerwaną pracę w warunkach obładzania się dolnego wymiennika ciepła, co w typowych układach jest niemożliwe i powoduje konieczność stosowania zapasowych układów grzewczych.

Niezwykle rozbudowany wstęp do pracy zawiera charakterystykę różnych rozwiązań pomp ciepła z uwzględnieniem systemów dopuszczających wymrażanie wody na powierzchni dolnego wymiennika ciepła. Krytycznej analizie poddano różne warianty układów dolnych wymienników ciepła w pompach ciepła dla których dolnym źródłem ciepła jest woda. Zasadniczą część pracy stanowią badania eksperymentalne nowatorskiego rozwiązania systemu pompy ciepła o konstrukcji umożliwiającej efektywną pracę w warunkach cyklicznego obładzania się parowacza. Układ ten oraz jego sterowanie zostały opisane szczegółowo na stronach 43 do 46. Następnie Autor sformułował zależności opisujące teoretyczny obieg lewobieżny uwzględniając wpływ na efektywność realizacji obiegu takich czynników jak wybór ziębniaka, regeneracja ciepła w doziębniaku i zanieczyszczenie ziębniaka czynnikiem smarnym. Przeprowadzone analizy teoretyczne pozwoliły na zaprojektowanie i skonstruowanie nowatorskiej konstrukcji pompy ciepła, która została następnie oprzyrządowana komputerowym układem pomiarowym umożliwiającym sterowanie pracą urządzenia i zbieranie mierzonych parametrów. W pracy zamieszczono schematy i zdjęcia stanowiska pomiarowego obrazujące złożoność układu. Na podkreślenie zasługuje wysoki poziom techniczny wykonanej instalacji, w której zastosowano najnowszej generacji elementy do budowy pompy ciepła i skomputeryzowane sterowanie pracą urządzenia. Na podkreślenie zasługuje samodzielny udział Autora w projektowaniu, wykonawstwie, uruchomieniu i prowadzeniu złożonych badań na stanowisku pomiarowym. Zbudowanie tak złożonego stanowiska i przeprowadzenie na nim całego szeregu czasochłonnych badań realizowanych w warunkach niestacjonarnych wynikających z dynamicznie zmieniającego się obładzenia parowacza zasługuje na szczególne podkreślenie i uznanie. Prowadzone badania mają charakter badań tak zwanych półtechnicznych z zachowaniem metod i dokładności pomiarów typowych dla badań laboratoryjnych. Na podkreślenie zasługuje prowadzenie badań w cyklach całorocznych, co pozwoliło na przetestowanie systemu pompy ciepła w rzeczywistych warunkach klimatycznych i uzyskanie informacji o funkcjonowaniu urządzenia w warunkach bardzo zbliżonych do warunków eksploatacyjnych. Eksperyment został zaplanowany i przeprowadzony metodą eksperymentu czynnego, w którym jako zmienne wejściowe przyjęto temperaturę par czynnika ziębniczego na ssaniu sprężarki, różnicę temperatur wody w basenie a temperaturą parowania oraz czas trwania jednego cyklu pracy urządzenia. Jako zmienną wyjściową przyjęto współczynnik efektywności energetycznej urządzenia. Uwzględniając, że istotą rozprawy doktorskiej jest pompa ciepła pozwalająca na pozyskiwanie ciepła przemiany fazowej zamarzającej na powierzchni parowacza wody, najistotniejszy z pośród wybranych parametrów wejściowych jest czas cyklu pracy urządzenia. Wyznaczenia tej wartości jest bardzo ważne dla ustalenia optymalnych wytycznych do eksploatacji takich układów. Ze względu na nowatorskie rozwiązanie, które nie było dotychczas testowane optymalny czas

cyklu przełączania nie może być dobrany na podstawie dostępnej w literaturze wiedzy lub doświadczeń z istniejących instalacji. Badania były prowadzone w cyklu całorocznym co zapewniło przebadanie urządzenia w pełnym zakresie temperatur wody w zbiorniku, w tym w zakresie temperatur w których występowało zjawisko krzepnięcia wody na powierzchni parowacza. Zakres temperatur wody w zbiorniku zobrazowano na rysunkach 5.1 i 5.2., gdzie pokazano przedziały czasowe gdy pompa ciepła funkcjonowała z wymrażaniem wody na powierzchni parowacza. Z wykresów tych wynika, że wymrażanie wody na powierzchni parowacza występuje przez okres od około 20 do 40 dni w roku przy najniższych temperaturach zewnętrznych. Należy podkreślić, że okresy te są jednocześnie czasem, gdy występuje największe zapotrzebowanie na ciepło grzewcze i możliwość nieprzerwanego funkcjonowania pompy ciepła w tych okresach jest niezwykle istotna dla oceny ich przydatności i sezonowej efektywności. Przeprowadzone pomiary realizowane według metod eksperymentu planowanego pozwoliły na wyznaczenie charakterystyk badanej pompy ciepła w funkcji parametrów wejściowych. Wyniki pomiarów pokazano w formie wykresów przedstawionych na rysunkach 5.4 do 5.14., które następnie poddano obróbce statystycznej pozwalającej na wyznaczenie funkcji regresji dla poszczególnych zmiennych. Na podkreślenie zasługuje opracowanie wyników w formie wykresów przestrzennych obrazujących zależność wielkości wyjściowej w funkcji dwóch zmiennych. Zestawienie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych i modelowania matematycznego pozwoliły na sformułowanie wniosków końcowych przedstawionych na stronach 166 do 169.

Spis literatury zawiera 68 pozycji, z których większość została opublikowana w ciągu ostatnich lat w czołowych czasopismach o zasięgu światowym jak np. *International Journal of Refrigeration*, *Renewable Energy*, oraz *Applied Energy*.

Ocena doboru tematu

Konieczność poszukiwania w inżynierii cieplnej rozwiązań zapewniających ograniczenie oddziaływania tych instalacji na środowisko naturalne wymaga opracowania nowatorskich rozwiązań umożliwiających wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii, co może być między innymi realizowane z wykorzystaniem pomp ciepła. Dla takich instalacji kluczowy jest wybór dolnego źródła ciepła, które w decydujący sposób wpływa na koszt inwestycyjny instalacji i jej charakterystyki cieplne. Jedną z możliwości jest wykorzystanie wody pochodzącej np. z naturalnych zbiorników lub rzek lub też ze specjalnie budowanych zbiorników retencyjnych, których głównym zadaniem jest przydomowa retencja wód opadowych. Jednym z czynników ograniczających efektywność pomp ciepła pozyskujących ciepło z wody jest zjawisko zamarzania wody w okresie niskich temperatur na powierzchni parowacza. Zjawisko to zbiega się w czasie z okresem największego zapotrzebowania na ciepło grzewcze, co w klasycznych rozwiązaniach pomp ciepła znacząco ogranicza

możliwości eksploatacji tych urządzeń w okresie niskich temperatur obniżając ich sezonową efektywność energetyczną i powodując konieczność ponoszenia dodatkowych nakładów inwestycyjnych na zapasowe źródła ciepła. Podjęcie prac naukowo rozwojowych nad nowatorskim układem pompy ciepła, która umożliwi pozyskiwanie ciepła z wody o niskiej temperaturze dopuszczając w trakcie cyklicznej pracy obładanie się parowacza jest z całą pewnością bardzo aktualne i odpowiadające na aktualne zapotrzebowanie rynku na tego typu urządzeń. Zaproponowany i przebadany w ramach pracy układ ma szanse na wdrożenie do produkcji i zastosowanie w instalacjach w budownictwie jednorodzinnych i przemysłowym. Szczególnie korzystne dla takich inwestycji mogą być obszary nadmorskie i położone w rejonach jezior i rzek. Rozwiązanie to pozwala bowiem na pozyskiwanie ciepła z tych źródeł przy niskich temperaturach wody, co dotychczas stanowiło barierę techniczną w rozwoju takich instalacji. Zagadnienie obładania się wymienników ciepła urządzeń chłodniczych i pomp ciepła jest zagadnieniem trudnym między innymi na ze względu na niestacjonarny charakter procesu i jest dziedziną stosunkowo nową, dotychczas rozwijaną zaledwie w kilku ośrodkach naukowych na świecie, a jednocześnie stanowi nowatorską kontynuację i rozwinięcie dotychczasowych badań realizowanych w Szkole wykreowanej przez Pana Profesora dr hab. inż. Bogusława Zakrzewskiego.

Uwagi o zawartości i treści pracy

Całość pracy napisana jest w sposób czytelny, staranny i ułatwiający zrozumienie często skomplikowanych zapisów i modeli. Na podkreślenie zasługuje staranne wykonanie rysunków i większości wykresów z zastosowaniem wydruku kolorowego znakomicie ułatwiającego zrozumienie prezentowanych treści.

Następujące zagadnienia poruszone w pracy mogą jednak stanowić podstawę do dyskusji lub dalszej analizy:

- Rozprawa doktorska jest niezwykle obszerna i zawiera wiele elementów, które można uznać za materiał odpowiedni do zamieszczenia w skrypcie akademickim z zakresu pomp ciepła, a nie koniecznie w rozprawie doktorskiej, która z zasady jest adresowana do grona osób o wysokiej wiedzy w omawianej tematyce.
- Wyniki uzyskane w pracy bazują w głównej mierze na wykonanych pomiarach na stanowisku badawczym. Podejście takie z reguły bardzo utrudnia przeniesienie uzyskanych wyników na inne urządzenia np. o innej wydajności lub konstrukcji wymienników ciepła lub zbiorników wodnych. Czy zdaniem Autora uzyskane wyniki umożliwiają uogólnienie opracowanych zależności przedstawionych w formie korelacji wyników pomiarowych tak, aby mogły one stanowić narzędzie przydatne przy projektowaniu takich układów?

- Zasadnicze badania zostały przeprowadzone według metody eksperymentu planowanego, który z jednej strony pozwala na optymalizację obróbki wyników, ale jednocześnie nakłada cały szereg ograniczeń i wymogów na zmienne wejściowe i warunki prowadzenia eksperymentu. Jednym z bardzo istotnych i często trudnych do spełnienia warunków jest niezależność zmiennych wejściowych. Czy zdaniem Autora ten warunek jest spełniony w odniesieniu do zaproponowanych zmiennych wejściowych?
- W prowadzonych badaniach Autor jako jeden z parametrów wejściowy przyjął czas cyklu pracy pompy ciepła. Czas ten wpływał istotnie na efektywność działania pompy ciepła. We wnioskach na stronie 167 (ostania linia na dole strony) podano, że czas potrzebny na uwolnienie lodu z powierzchni oblodzonego parowacza wynosił średnio 20 minut. Powstaje zatem pytanie czy wartość ta nie jest wielkością wymiarującą długość cyklu działania pompy ciepła, gdyż cykl nie może być krótszy niż czas potrzebny na uwolnienie lodu z wymiennika ciepła.
- Biorąc pod uwagę wytyczne dla projektantów i automatyki przyszłych rozwiązań komercyjnych byłoby ważne, aby określić jakie grubości narastającego lodu należy dopuszczać na powierzchni parowacza. Czy Autor może podać jakie wartości należy uznać za zalecane dla takich pomp ciepła? Czy zdaniem Autora grubość lodu mogłaby być lepszą wartością sterującą cyklami przełączania niż zadany czas cyklu? W systemie sterowania opartym na grubości lodu wymrożonego na powierzchni parowacza przy warunkach termicznych nie doprowadzających do obładzania wymiennika (czyli przez około 330 dni w roku) pompa ciepła funkcjonowałaby bez przełączania.

Ocena końcowa

Przytoczone uwagi i sugestie nie wpływają w sposób zasadniczy na końcową pozytywną ocenę pracy. Przedłożona rozprawa stanowi oryginalne nowatorskie rozwiązanie istotnego zagadnienia naukowego, którym jest opracowanie i optymalizacja konstrukcji pompy ciepła wykorzystującej ciepło przemiany fazowej wody wymrażanej cyklicznie na powierzchni parowacza. Do szczególnych osiągnięć Autora można zaliczyć trafne sformułowanie i zweryfikowanie opisu analitycznego, zbudowanie złożonego w pełni skomputeryzowanego stanowiska pomiarowego do badania pompy ciepła oraz przeprowadzenie serii trudnych długotrwałych badań zrealizowanych w cyklu rocznym dla pełnego zakresu warunków klimatycznych. Wykonane badania pozwoliły udowodnić postawioną w pracy tezę o możliwości skonstruowania wysoko efektywnej pompy ciepła,

która może wykorzystywać jako dolne źródło ciepła wodę o niskiej temperaturze przy dopuszczeniu cyklicznego obładzania się powierzchni parowacza.

Treść pracy pozwala stwierdzić, że Autor posiada ogólną wiedzę teoretyczną z zakresu dyscypliny naukowej budowa i eksploatacja maszyn oraz posiada umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Przedstawiona do oceny praca spełniała wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami).

Wnioskuje o dopuszczenie Pana mgra inż. Wojciecha Tuchowskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej zatytułowanej „Badania eksperymentalne efektywności pompy ciepła wykorzystującej utajone ciepło zamarzania wody”.

24.07.2015 J. Soluski