

Szczecin 12.06.2017r.

Prof. dr hab. inż. Bogusław Zakrzewski prof. zw.  
Katedra Klimatyzacji i Transportu Chłodniczego  
Wydział Techniki Morskiej i Transportu  
Zachodniopomorski Uniwersytet  
Technologiczny w Szczecinie  
71065 Szczecin, al. Piastów 41

**Recenzja**  
**Rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Hałona**

pt.

**„OPTYMALIZACJA PARAMETRÓW PROCESU WRZENIA ZIĘBNIKA W  
NISKOCIŚNIENIOWYM ADSORPCYJNYM SYSTEMIE TRIGENERACYJNYM”**

**Wprowadzenie**

Opinie opracowano w odpowiedzi na pismo Pana prof. zw. dr hab. inż. Zbigniewa Gnutka, Dziekana Wydziału Mechaniczno –Energetycznego Politechniki Wrocławskiej we Wrocławiu z dnia 24.04.2017 wraz z informacją , że zgodnie z uchwałą Rady Wydziału z dnia 29 marca 2017 zostałem powołany na recenzenta pracy doktorskiej mgr inż. Tomasza Hałona, której promotorem jest Prof. dr hab. inż. Zbigniew Królicki, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Bartosz Zajączkowski.

**Ocena problematyki badawczej pracy**

Nieustanny rozwój ilościowy systemów klimatyzacji jest związany z dążeniem do poprawy warunków egzystencji ludzi na całym świecie. W wielu krajach z umiarkowanej strefy klimatycznej stosowana jest kogeneracja co związane jest z zapotrzebowaniem na energię cieplną w sezonie grzewczym na przykład w Polsce przez około 240 dni roku. Pozostała część roku to wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną dla instalacji chłodniczych w systemach klimatyzacji który w okresie szczytu letniego znacznie przekracza zapotrzebowanie w okresie zimowym, a co występuje nie tylko w krajach tropikalnych czy śródziemnomorskich ale notuje się już i w Polsce.

Stąd powstają warunki na zastosowanie systemów trigeneracyjnych w których przy wytwarzaniu energii elektrycznej można wykorzystać ciepło odpadowe do produkcji chłodu w okresie letnim, zmniejszy to zapotrzebowanie na energię elektryczną i emisję CO<sub>2</sub>. Technologia która to umożliwia jest sorpcja (absorpcja lub adsorpcja)

Doktoranta jak i wielu badaczy zainteresowała tematyka trigeneracji, stąd temat pracy optymalizacja parametrów procesu wrzenia ziębniaka w niskociśnieniowym adsorpcyjnym systemie trigeneracyjnym .

Celem pracy jest maksymalizacja współczynnika wnikania ciepła przy wrzeniu, zachowując jak najmniejszą temperaturę ścianki parowacza. W konsekwencji doprowadzi to do zmniejszenia adsorpcyjnych urządzeń chłodniczych stosowanych w trigeneracji oraz zwiększenia ich sprawności i konkurencyjności na rynku (poprzez zmniejszenie ceny i rozmiarów).

Wybór tematu badań maksymalizacja współczynnika wnikania ciepła przy wrzeniu ziębniaka w niskociśnieniowym adsorpcyjnym systemie trigeneracyjnym uważam za bardzo celowy i w pełni uzasadniony.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia ..... 19-06-2017  
W91903

### **Formalna analiza rozprawy**

Maszynopis dysertacji mgr inż. Tomasza Hałona, przedstawionej do recenzji, obejmujący łącznie: spis treści, tekst pracy, 5 tabel, 99 rysunków w tym 17 w dodatku A i B, spis cytowanej literatury zawiera 86 pozycji, w tym 75 to pozycje obcojęzyczne .

Tytuł pracy jest krótki i komunikatywny, adekwatny do treści maszynopisu. Układ rozprawy jest logiczny, ograniczony do zagadnień merytorycznych, niezbędnych dla przeprowadzenia wywodu zgodnego z koncepcją Doktoranta.

Zasadnicza część pracy składa się z 7 rozdziałów, a mianowicie: 1. Wybrane zagadnienia wymiany ciepła przy wrzeniu. 2 . Chłodnicze systemy adsorpcyjne . 3. Metody intensyfikacji procesu wrzenia. 4. Wrzenie z powierzchni płaskiej w pod-ciśnieniu. 5. Wrzenie na powierzchni rozwiniętej przy obniżonym ciśnieniu. 6. Symulacje dla powierzchni TS i NTS. 7. Wnioski. Dodatki: A-Teoretyczne i eksperymentalne współczynniki wnikania ciepła. B Wpływ wysokości słupa cieczy na współczynnik wnikania. Rozdział pierwszy poprzedza Wstęp, Teza, cel, zakres i metody badań. Rozdziały 1,2,3,4,5 i 6 zawierają podrozdziały.

Praca jest przygotowana bardzo starannie i napisana pięknym językiem polskim. Na uwagę zasługuje staranne opracowanie wyników oraz zamieszczenie rysunków ułatwiających studiowanie pracy.

### **Merytoryczna analiza pracy.**

We wstępie Autor przybliży znaczenie procesu wrzenia i wyjaśnia że jest wykorzystywany w wielu gałęziach techniki. Istotną zaletą procesu wrzenia jest wysoki współczynnik wnikania ciepła, co związane jest z powstawaniem, wzrostem i oderwaniem się pęcherzy pary. Wzrost pęcherza powoduje ruch cieczy, a oderwanie jej mieszanie z tego powodu kształt, wielkość oraz częstość odrywania się pęcherzy ma duże znaczenie przy wrzeniu. Woda ze znanych czynników chłodniczych ma największe ciepło parowania jest łatwo dostępna i tania, dalej Autor zauważa też niskie ciśnienie nasycenia w temperaturach 5-12°C i odpowiednio 0,87 - 1,4 kPa co jest przyczyną większego niż 10K przegrzania ścianki, powstające pęcherze są większe i ich częstotliwość odrywania mniejsza, stąd współczynniki wnikania ciepła  $\alpha$  są mniejsze o rząd wielkości niż dla ciśnienia atmosferycznego. W efekcie konieczne jest zwiększenie powierzchni wymiennika, rosną też spadki ciśnienia i jego masa.

W punkcie **Teza, cel i metody badań** Doktorant stawia tezę, że w warunkach niskiego ciśnienia maksymalną wartość funkcji współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  można uzyskać poprzez modyfikację powierzchni zwiększającą częstotliwość odrywania pęcherzy i ilość stref nukleacji. Modyfikacja powierzchni polegać ma na stworzeniu sztucznych miejsc nukleacji oraz rozdzieleniu miejsc zaciągania cieczy od miejsc opuszczania pęcherzy gazowych.

Autor trafnie wyznacza sobie **3 cele badawcze**:

- zwiększenie wydajności parowaczy podciśnieniowych przy minimalnych wartościach przegrzania wymaganych dla wrzenia pęcherzykowego przy jednoczesnym zwiększeniu współczynnika wnikania ciepła,
- określenie najlepszych wymiarów powierzchni rozwiniętych z tunelami podpowierzchniowymi i określenie parametrów kształtu powierzchni wpływających na współczynnik wnikania ciepła,
- sprawdzenie wpływu wysokości słupa cieczy na wrzenie przy podciśnieniu.

W podpunkcie **przedmiot i zakres badań** Autor precyzuje że jego praca dotyczy tzw. naturalnych czynników chłodniczych i aplikacyjnie zorientowana jest na konstrukcję parowacza adsorpcyjnego systemu trigeneracyjnego. Przedmiotem pracy jest analiza procesu wrzenia wody zachodzącego w niskich ciśnieniach z powierzchni płaskiej oraz ze struktury rozwiniętej z tunelami podpowierzchniowymi. Ponadto, przedmiot rozprawy stanowi efektywność różnych rodzajów powierzchni na wydajność niskociśnieniowych parowaczy do chłodniczych systemów adsorpcyjnych. Badania dotyczyły naturalnych czynników chłodniczych: wody destylowanej i

metanolu przy ciśnieniach od 0,3 do 18 kPa, w zakresie gęstości strumieni ciepła 0,43 do 5,93 W/cm<sup>2</sup>, a przebadane wysokości słupa cieczy to 5,7, 18,9 i 32,3mm.

Badane struktury rozwinięte o tunelach podpowierzchniowych udostępnił dr hab. Robert Pastuszko z Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej, było to 6 różnych powierzchni (3NTS i 3TS). Wybrane struktury posiadają 3 główne żebra o wysokości 5 mm. W przypadku struktur typu NTS struktury wąskotunelowe - żebra były sfrezowane na wskroś co utworzyło mini żebra, dwie z badanych struktur NTS posiadały pokrycie z folii miedzianej o grubości 0,1 mm z perforacjami wykonanymi metodą trawienia chemicznego o średnicy perforacji 0,2 mm. Drugim rodzajem struktur wykorzystanych w pracy były powierzchnie typu TS (struktury tunelowe) w których wycięto mikrorowki na bocznych powierzchniach żeber głównych i w poziomych przestrzeniach międzyżebrowych. Następnie dzięki spiekaniu dwie z nich zostały pokryte miedzią folią perforowaną o średnicy perforacji 0,2mm.

W podpunkcie **metody badań** Autor przedstawia badania przeprowadzone na dwóch stanowiskach badawczych. Wpływ ciśnienia oraz wysokości słupa cieczy na wrzenie w objętości przy ciśnieniu sub-atmosferycznym przeprowadzono w Laboratorium Chłodnictwa i Kriogeniki, wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej na stanowisku należącym do Zakładu Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych. Mierzono temperaturę przegrody ogrzewanej drutem oporowym oraz ciśnienie w zbiorniku. Na podstawie różnicy między temperaturą przegrody, a temperaturą nasycenia wyznaczono współczynnik wnikania ciepła. Wrzenie ze struktur rozwiniętych przebadano w Laboratorium należącym do Centrum Badań Termicznych i Energetycznych (Centre d'Energetique et de Thermique de Lyon - CETHIL) przy Narodowym Instytucie Badań Stosowanych w Lyonie (Institut national des sciences appliquees de Lyon - INSA). Zmierzono chwilowe gęstości strumienia ciepła przy stałym zadanym strumieniu ciepła, temperaturę podstawy struktury w trzech miejscach oraz ciśnienie. Na podstawie chwilowych gęstości strumienia ciepła oraz temperatury podstawy struktury wyznaczono współczynnik wnikania ciepła. Ponadto nagrano proces nukleacji ze struktur za pomocą kamery szybkiej, o prędkości zapisu 1000 klatek na sekundę.

**W rozdziale pierwszym** dotyczącym wybranych zagadnień wymiany ciepła przy wrzeniu, autor opisuje wrzenie w objętości przy ciśnieniu atmosferycznym lub wyższym. Dotyczy to dynamiki wzrostu i oderwania się pęcherza pary z powierzchni płaskiej, w dalszej części jest też przedstawiony obszerny przegląd korelacji współczynnika wnikania ciepła przy wrzeniu wody z powierzchni płaskiej. Korelacje ukazują wnikanie ciepła przy wrzeniu ze znanym przegrzaniem ścianki i ze znaną gęstością strumienia ciepła. Autor przedstawia też korelacje dla wrzenia metanolu. W dalszej części omawia wpływ niskiego ciśnienia na dynamikę nukleacji, współczynnik wnikania ciepła i wpływ wysokości słupa cieczy. Już samo zapoznanie się z literaturą dotyczącą tematyki wrzenia było bardzo poważnym zadaniem. Autor wywiązał się z tego znakomicie i przygotowany obszerny przegląd piśmiennictwa zaznajamia czytelnika z zagadnieniami wrzenia z powierzchni płaskiej.

**W rozdziale drugim** Doktorant przedstawia chłodnicze systemy adsorpcyjne w trigeneracji, schemat ideowy urządzenia i przykłady instalacji trigeneracyjnych, następnie ukazuje główne typy konstrukcji parowaczy stosowanych w systemach adsorpcyjnych:

- parowacze objętościowe,
- parowacze ociekowe,
- parowacze kapilarne.

Następnie omawia zalety i wady różnych rozwiązań parowaczy oraz podaje przykłady instalacji trigeneracyjnych. Na koniec omawia wpływ temperatury parowania na system adsorpcyjny.

**W rozdziale trzecim** Autor przedstawia 3 metody intensyfikacji procesu wrzenia: aktywne, pasywne i mieszane. Najwyżej ocenia metodę pasywną bo nie wymaga doprowadzenia

dodatkowej energii ani elementów ruchomych dla struktur tunelowych. Następnie omawia struktury tunelowe i opisuje mechanizm przenoszenia ciepła i wpływ niskiego ciśnienia na struktury tunelowe. W dalszej części rozdziału przedstawiono modele matematyczne wrzenia z powierzchni tunelowych typu: zalewanie, parowanie- zasysanie oraz wspomina o wrzeniu typu statycznego.

**W rozdziale 4** Doktorant przedstawia wrzenie z powierzchni płaskiej przy podciśnieniu. W początkowej części ukazuje stanowisko badawcze, stosowaną procedurę badań oraz analizę niepewności pomiarowych.

W dalszej części rozdziału jest analizowany wpływ niskiego ciśnienia na współczynnik wnikania ciepła oraz otrzymywane korelacje dla wody i metanolu zestawione w tabeli 4.1 i porównano z zależnościami wielu autorów. Najdokładniejsze jeśli bierzemy pod uwagę przegrzanie są wzory Mostińskiego oraz Jacoba i Hawkinsa oba zawyżają jednak współczynnik wnikania ciepła. Spośród korelacji biorących pod uwagę gęstość strumienia ciepła najlepsze są korelacje Stephena-Abdelsalama i Łabuńcowa. Doktorant wyznacza też własne empiryczne współczynniki do równania pochodzącego z analizy wymiarowej i uzyskuje  $SOW = +0,02$  w podsumowaniu stwierdza, że w zbadanych warunkach współczynnik wnikania ciepła okazał się zależny głównie od gęstości strumienia ciepła.

Badania wpływu wysokości słupa cieczy na proces wrzenia przeprowadzono dla powierzchni o chropowatości  $Ra = 0,659$  przy 9 gęstościach strumienia ciepła  $q: 0,43 \div 5,93 \text{ W/cm}^2$ , przy ciśnieniu  $p_e = 0,9-4 \text{ kPa}$

Ukazuje następnie krzywą wrzenia dla ciśnienia atmosferycznego i uzyskane wyniki z eksperymentów które wykazują na niewielki wpływ ciśnienia na współczynnik wnikania ciepła. Stwierdza że im niższe ciśnienie tym charakterystyka wrzenia przesunięta jest w kierunku większego przegrzania. To znaczy że większe przegrzanie musi być uzyskane aby wystąpiło wrzenie pęcherzykowate (dla  $p = 1,3 \text{ kPa} - \Delta T = 20 \text{ K}$ ).

W badanym zakresie ciśnień woda i metanol mają płaską zależność współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  od ciśnienia. Korelacje Stephana-Abdelsalama i Łabuńcowa dla wody lub też korelacja pochodząca z analizy wymiarowej dla wody i metanolu własne Autora można polecać i podaje współczynniki  $c, m$  i  $n$  dla wody i metanolu

**W rozdziale 5** Autor ukazuje proces wrzenia na powierzchni rozwiniętej przy obniżonym ciśnieniu. W części początkowej przedstawia opis stanowiska badawczego Centrum Energetycznego, Termicznego Lyonu będące częścią narodowego Instytutu badań stosowanych (INSA). Podczas każdego pomiaru procesu wrzenia był rejestrowane na szybkiej kamerze 1000 kl/s dla dwóch wysokości słupa cieczy  $H = 5$  i  $28,7 \text{ mm}$ . Dalej opisuje szczegółowo procedurę badawczą i analizuje niepewności pomiarowe. Badane miedziane powierzchnie zaprojektowane zostały przez dr hab. inż. R Pastuszkę.

Podrozdział 5.2. dotyczy wrzenia z powierzchni typu NTS i ukazuje proces oderwania pęcherza jego częstotliwość oraz wyniki współczynnika wnikania ciepła, powierzchnia rozwinięta NTS-1 zwiększyła dwukrotnie współczynnik wnikania ciepła w porównaniu do powierzchni płaskiej. Powierzchnie rozwinięte NTS-2 i 3 zwiększyły ~czterokrotnie współczynnik wnikania ciepła.

Podrozdział 5.3. Dotyczy wrzenia z powierzchni typu TS i ukazuje proces nukleacji pęcherza, jego częstotliwość oraz wyniki pomiarów współczynnika wnikania ciepła. Porównanie powierzchni NTS i TS wykazało że powierzchnia TS-2 najbardziej intensyfikuje wymianę ciepła. Wszystkie badane przez Doktoranta powierzchnie rozwinięte zwiększyły współczynnik wnikania

ciepła w porównaniu do powierzchni płaskiej. Jednak TS-2 aż dziesięciokrotnie powiększyła współczynnik wnikania.

**W rozdziale 6** Autor przedstawia symulacje dla powierzchni TS i NTS korzystając z modelu zaproponowanego przez Pastuszkę, który został przemnożony przez wyznacznik ciśnienia który był wcześniej stosowany przez wielu autorów Jacoba, Mostńskiego i innych. Autor dalej ukazuje założenia, przyjęte uproszczenia i ich znaczenie dla niskiego ciśnienia. Jak wynika z obliczeń po zastosowaniu empirycznych przeliczników (tabela 6.1) uzyskano dokładność zbliżoną do dokładności wyników przy ciśnieniu atmosferycznym.

**W kolejnym 7 rozdziale „Wnioski”** Autor wnikliwie i umiejętnie podsumowuje rezultaty badań wrzenia naturalnych czynników chłodniczych z powierzchni płaskich i ze struktur tunelowych przy niskich ciśnieniach.

Potwierdza też użyteczny charakter zaprojektowanych struktur tunelowych prowadzący w jednej ze struktur do dziesięciokrotnego zwiększenia współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  w porównaniu do powierzchni płaskiej.

### **Wniosek końcowy**

Podsumowując należy stwierdzić że podjęte przez mgr inż. Tomasza Hałona badania i uzyskane wyniki są ważne z poznawczego i aplikacyjnego punktu widzenia. Praca wnosi nowe oryginalne i istotne elementy do tej dziedziny.

Na tle szerokiej analizy podjętego problemu badawczego, w oparciu o najnowszą literaturę, cel pracy został jasno sprecyzowany, a do jego realizacji została dobrana metodyka badań. Uzyskane interesujące wyniki badań przedstawiono na rysunkach i tabelach, dały podstawę do dobrze przeprowadzonej analizy i sprecyzowania wyników. Doktorant skoncentrował się na istotnych, związanych z celem badań problemach, a ich rezultaty szeroko przedyskutował w oparciu o literaturę. Świadczy to o rozległej i ugruntowanej Jego wiedzy w badanym temacie.

Największym osiągnięciem pracy jest przedstawienie wizualizacji procesu wrzenia w warunkach niskiego ciśnienia z powierzchni rozwiniętych. Są to nowe wyniki, pozwalające lepiej zrozumieć przemiany fazowe zachodzące przy niskim ciśnieniu. Przedstawione zdjęcia potwierdzają istnienie wrzenia cyklicznego zaobserwowanego w literaturze dla powierzchni płaskiej. Zwrócono uwagę na wpływ wysokości słupa cieczy na kształt i wielkość pęcherzy oraz na przenoszenie ciepła.

Reasumując mogę stwierdzić, że przedstawiony maszynopis rozprawy, zawierający opisane w nim metody rozwiązania problemu, wyniki badań, analizy wyników i wnioski zaproponowane przez doktoranta, mgr inż. Tomasz Hałona, w mojej opinii spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z przepisami ustawy określone w rozdziale II art. 13 pozycja 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule Naukowym w Zakresie Sztuki, (Dz. U. 03. Nr 65, poz.595 z dn. 16.04.2003 z późniejszymi zmianami).

Jednocześnie ze względu na szeroki i bardzo aktualny zakres badań oraz wyróżniające się również stylistycznie, graficznie i redakcyjnie opracowanie wyników wraz z ich dużą wartością poznawczą i użyteczną wnioskuje o wyróżnienie pracy.

KIEROWNIK  
Katedry Klimatyzacji i Transportu Chłodniczego  
prof. dr hab. inż. Bogusław Zakrzewski, prof. zw.