

dr hab. inż. Robert Pastuszko, prof. ndzw. PŚk
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
Al. Tysiąclecia P.P. 7
25-314 Kielce
tel.: (41) 3424716
email: tmprp@tu.kielce.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Hałona

pt. *Optymalizacja parametrów procesu wrzenia ziębnika w niskociśnieniowym adsorpcyjnym systemie trigeneracyjnym*

1. Charakterystyka ogólna

Opiniowana praca dotyczy badań wrzenia pęcherzykowego naturalnych czynników chłodniczych (ziębników) w dużej objętości przy niskich ciśnieniach (od 0,3 do 18 kPa) z powierzchni płaskiej oraz ze struktury rozwiniętej z tunelami podpowierzchniowymi. Praca ma charakter badań podstawowych, co uważam za szczególnie godne podkreślenia, jak również utylitarny – wyniki mogą być zastosowane do projektowania parowacza adsorpcyjnego systemu trigeneracyjnego.

Skutecznym sposobem chłodzenia jest wykorzystanie procesów wrzenia na specjalnie dobranej powierzchni strukturalnej. Odpowiednio duża liczba otwartych porów, rozwinięcie powierzchni, zastosowanie wgłębień lub tuneli podpowierzchniowych pozwalają na zwiększenie liczby aktywnych ośrodków wrzenia, co skutkuje zmniejszeniem przegrzania powierzchni przy równoczesnym powiększeniu odprowadzanych strumieni ciepła. Ten sposób intensyfikacji wymiany ciepła, ze względu na wrzenie w tzw. dużej objętości, nie wymaga stosowania urządzeń wymuszających konwekcję (pompy, wentylatory), przez co jest bardziej ekonomiczny w porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami, a ponadto charakteryzuje się znacznie większymi współczynnikami przejmowania ciepła niż w przypadku konwekcji wymuszonej. Mimo wysiłków wielu pokoleń badaczy mechanizm wrzenia nie został w pełni opisany. Zależności na współczynnik przejmowania ciepła dostępne w literaturze są wzorami empirycznymi lub półempirycznymi, przy czym ich zakres zastosowania nie obejmuje parametrów używanych w chłodnictwie.

Intensyfikacja wymiany ciepła podczas wrzenia (*boiling heat transfer enhancement*) odgrywa dużą rolę w urządzeniach klimatyzacyjnych, kompaktowych wymiennikach ciepła, mikroelektronice oraz układach trigeneracyjnych, będących obszarem zainteresowania Doktoranta. Trigeneracja umożliwia równoczesną produkcję ciepła, energii elektrycznej i chłodu poprzez zastosowanie sorpcyjnych instalacji chłodniczych, wykorzystujących przeważnie ciepło odpadowe do zaspokajania potrzeb w zakresie chłodnictwa i klimatyzacji. Doktorant słusznie zauważył, że woda, charakteryzująca się największym ciepłem parowania spośród znanych substancji, stosowana jest często jako czynnik chłodniczy w chłodziarkach adsorpcyjnych, jak również w chłodziarkach absorpcyjnych bromo-litowych. Układy adsorpcyjne stają się coraz popularniejsze w technice chłodniczej stwarzając interesujące możliwości utylizacji niskotemperaturowego ciepła odpadowego.

Głównym celem opiniowanej pracy doktorskiej było przeprowadzenie badań eksperymentalnych umożliwiających ocenę możliwości zastosowania wybranych powierzchni strukturalnych z tunelami podpowierzchniowymi do intensyfikacji wymiany ciepła podczas wrzenia wody lub metanolu przy niskich ciśnieniach, pod kątem ich zastosowania w

adsorpcyjnym systemie trigeneracyjnym. Zaproponowana metodyka badań umożliwiła uzyskanie krzywych wrzenia dla powierzchni płaskich i strukturalnych, jak również przeprowadzenie wizualizacji optycznej procesu tworzenia i odrywania pęcherzy parowych.

2. Część szczegółowa

Rozprawa przedstawiona jest na 121 stronach maszynopisu formatu A4 w języku polskim. Na pracę składa się 7 rozdziałów numerowanych, poprzedzonych wstępem oraz rozdziałem *Teza, cel, zakres i metody badań*, jak również 2 dodatki i wykaz literatury. Zawarto w niej 99 rysunków, 5 tabel i 86 zacytowanych pozycji bibliograficznych, w większości publikacji w czasopiśmie w języku angielskim (w tym 6 pozycji, których współautorem jest Doktorant). Na początku rozprawy umieszczono spis oznaczeń i symboli. Tytuły poszczególnych rozdziałów numerowanych są następujące: (1) Wybrane zagadnienia wymiany ciepła przy wrzeniu, (2) Chłodnicze systemy adsorpcyjne w trigeneracji, (3) Metody intensyfikacji procesu wrzenia, (4) Wrzenie z powierzchni płaskiej w podciśnieniu, (5) Wrzenie na powierzchni rozwiniętej przy obniżonym ciśnieniu, (6) Symulacje dla powierzchni TS i NTS oraz (7) Wnioski.

Rozdziały związane z przeglądem literatury (1—3) zajmują około połowę objętości pracy, co może się wydawać zbyt obszerne. Autor przeanalizował jednak nie tylko szeroki zakres zagadnień związanych z wrzeniem na powierzchni płaskiej, równaniami korelacyjnymi do wyznaczania współczynników przejmowania ciepła oraz wpływem niskiego ciśnienia, lecz także włożył dużo pracy w omówienie instalacji trigeneracyjnych i przedstawienie konstrukcji parowników systemów adsorpcyjnych. Bardzo dokładnie zostały omówione zagadnienia związane z intensyfikacją wrzenia poprzez zastosowanie powierzchni rozwiniętych oraz struktur typu tunel-por. Autor wykazał się dużą dojrzałością zwracając uwagę na fizyczną stronę skomplikowanych mechanizmów wymiany ciepła przy zmianie fazy w powierzchniach tunelowych. Podział przeglądu literatury jest spójny i bezpośrednio związany z tematyką własnych badań, przedstawianych w kolejnych rozdziałach. Brakuje jednak krótkiego podsumowania omawianych zagadnień. Dwa kolejne rozdziały dotyczą badań własnych, przy czym w rozdziale (4) przedstawiono wyniki eksperymentów związanych z wrzeniem pęcherzykowym na powierzchni płaskiej, a w rozdziale (5) omówiono badania na powierzchniach strukturalnych. Rozdział (6) opisuje propozycję modyfikacji modelu dla powierzchni ze strukturami tunelowymi pod kątem zastosowania we wrzeniu przy niskim ciśnieniu (1 – 4 kPa). Warto zaznaczyć, że pomiary przeprowadzono na dwóch stanowiskach badawczych w różnych ośrodkach naukowych:

- wpływ ciśnienia oraz wysokości słupa cieczy na wrzenie w objętości przy podciśnieniu – w Laboratorium Chłodnictwa i Kriogeniki Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej,
- wrzenie ze struktur rozwiniętych z wizualizacją optyczną (1000 klatek na sekundę) – w Centre d’Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL) przy Narodowym Instytucie Badan Stosowanych w Lyonie.

Biorąc pod uwagę przeprowadzoną przez Doktoranta analizę stanu wiedzy w wyżej opisanej tematyce, wyniki badań własnych oraz sformułowane cele pracy dotyczące zwiększenia wydajności parowaczy podciśnieniowych i określenia najlepszych wymiarów powierzchni rozwiniętych z tunelami podpowierzchniowymi, uważam, że:

- podjęcie prezentowanej tematyki jest w pełni uzasadnione z poznawczego punktu widzenia, jak też i praktyki inżynierskiej,
- przedstawiona teza pracy o możliwości uzyskania, w warunkach obniżonego ciśnienia, maksymalnej wartości współczynnika przejmowania ciepła poprzez modyfikację powierzchni, zwiększającą częstotliwość odrywania pęcherzy i ilość aktywnych stref nukleacji została poprawnie sformułowana.

Autor uzupełnia tezę słusznym założeniem, że „modyfikacja powierzchni polegać ma na stworzeniu sztucznych miejsc nukleacji oraz rozdzieleniu miejsc zaciągania cieczy od miejsc opuszczania pęcherzy gazowych”, jednak słowo *zaciąganie* powinno być zastąpione terminem *zasysanie* lub *dopływ*.

Autor bardzo skrupulatnie udokumentował metodykę pomiarową. Ze względu na specyfikę stanowisk pomiarowych na Politechnice Wrocławskiej i w Lyonie zastosowano odmienną metodę wyznaczania gęstości strumienia ciepła, co może rodzić pewne wątpliwości odnośnie porównywania uzyskiwanych wyników. Dla każdego ze stanowisk przeprowadzono analizę błędów pomiarowych. Na uwagę zasługuje przeprowadzenie przez Doktoranta dokładnego porównania uzyskanych danych eksperymentalnych dla wrzenia na powierzchni płaskiej z dostępnymi równaniami korelacyjnymi i przedstawienie ich w postaci zależności współczynnika przejmowania ciepła od ciśnienia przy różnych gęstościach strumienia ciepła lub przegrzaniach. Z dużym uznaniem należy przyjąć wyniki badań wizualizacyjnych – dobrej jakości zdjęcia z szybkiej kamery (1000 klatek/s) mogą w przyszłości umożliwić utworzenie dokładnego modelu wrzenia na powierzchniach ze strukturami tunelowymi przy niskich ciśnieniach. Przedstawiona w pracy kompilacja istniejącego modelu półempirycznego dla powierzchni TS i wyznacznika ciśnienia pozwoliła na uzyskanie zadowalającej dokładności $\pm 35\%$.

W przedstawionej do oceny pracy znalazłem nieliczne nieścisłości merytoryczne lub z zakresu zastosowanej terminologii oraz bardzo liczne błędy edycyjne, jak również stylistyczne i gramatyczne. Niektóre z przedstawionych wykresów wymagają poprawy czytelności poprzez powiększenie czcionek w opisie osi i legendzie oraz zastosowanie większych znaczników lub wprowadzenie kolorów. Uwagi te jednak nie wpływają na całościową ocenę merytoryczną, która świadczy, że Doktorant wykonał pracę doktorską na odpowiednim poziomie naukowym z wykorzystaniem aktualnych metod i technik badawczych.

Poniżej przedstawiam wyszczególnienie reprezentatywnych przykładów ww. błędów oraz innych błędów i nieścisłości:

- niewłaściwe stosowanie łączników, przykładowo *około-atmosferyczne, pod-ciśnienie, sub-atmosferyczne między-żebrowe* pisze się bez łącznika;
- liczne błędy stylistyczne, gramatyczne lub interpunkcyjne, które utrudniają lub wręcz uniemożliwiają zrozumienie sensu niektórych zdań, kilka przykładów:
 - str. 4: *przedmiot rozprawy stanowi efektywność różnych rodzajów powierzchni*
 - str. 22: *Autorzy nie zaobserwowali przy tym żadnej zależności na to kiedy pęcherz pęka, a kiedy może rosnać tak długo aż się zapadnie*
 - str. 23: *po pobieżnym przeglądzie krzywych wrzenia*
 - str. 24: *nie ma potrzeby na przeliczanie wyników pomiaru ...*
 - str. 35: *metody mieszane, to takie łączące oba wyżej wymienione rodzaje intensyfikacji,*
 - str. 44: *Strumień ciepła przekazany na zewnątrz tunelu zostały użyte dwie metody...*
 - str. 47: *Autorzy zaobserwowali, że czasami przez pory w tunelu poziomym również powstają pęcherze*
 - str. 70: *zachodziło wtedy do powstawania pęcherzy...*
 - str. 72: *pęcherz rozpoczął rosnać...;*
- najważniejsze uwagi dotyczące formatowania tekstu:
 - nieścisłością jest używanie czcionek prostych lub pochylonych na oznaczenie tej samej wielkości fizycznej, czego przykładem jest oznaczenie pismem prostym wielkości p i T , umieszczonych na rys. 1.10, str. 23, chociaż w spisie oznaczeń

- i symboli ww. wielkości fizyczne oznaczono czcionkami pochylonymi (tzw. kursywą);
- w pracy na oddzielenie części dziesiętnych w liczbach stosowano zamiennie przecinki lub kropki, co jest błędem, gdyż w języku polskim powinno się stosować oddzielenie części dziesiętnych przecinkiem; przykładowo na wykresach w Dodatku B w legendach zastosowano oddzielenie kropką, a w podpisach rysunków – przecinkiem;
 - stosowanie tzw. kalki językowej z angielskiego: zamiast *kondukcja* (np. str. 9) powinien być stosowany polski termin *przewodzenie*;
 - najważniejsze uwagi dotyczące oznaczeń:
 - w spisie oznaczeń brakuje m.in. wyjaśnienia skrótów TS, NTS, jak również wyjaśnienia wielkości n_s , o , z , f , v ; brakuje wyjaśnienia indeksów dolnych, m.in.: *tun*, *zew*, *ne*, *f*; n_s pojawia się w tekście na str. 46 bez opisu tej wielkości;
 - gęstość strumienia ciepła oznaczana jest albo jako q , albo \dot{q} ;
 - błędny opis: współczynnik przewodzenia ciepła k , W/m²K, powinien być opisany jako współczynnik przenikania ciepła; indeks e w tekście dotyczy ciśnienia w zbiorniku; liczba Jakoba (błędnie *Jacoba*) powinna być zapisana $c_p \Delta T / h_{fg}$;
 - w spisie oznaczeń indeks d określono jako *oderwania*, b – *wyporu*, natomiast we wzorach na str. 14 i 15 średnica oderwania jest oznaczona d_b ;
 - w tekście na str. 17 ciśnienie krytyczne oznaczone jest p_{kr} zamiast p_{crit} ;
 - w tekście na str. 43 współczynnik wnikania (przejmowania) ciepła oznaczono literą h (w spisie oznaczeń i wcześniej we wzorach stosowano α);
 - nieprawidłowy zapis jednostek:
 - gęstość strumienia ciepła: jednostka wyszczególniona została prawidłowo w spisie oznaczeń jako [W/m²], natomiast w całym tekście pracy i na rysunkach/wykresach Autor stosuje [W/cm²] (z wyjątkami, np. Rys. 1.11 na str. 24); uważam, że zgodnie z układem SI należy stosować [W/m²] lub [kW/m²] – takie jednostki są używane w przeważającej ilości publikacji i podręczników z zakresu wymiany ciepła;
 - na str. 37 dwukrotnie pojawia się błędny zapis jednostki gęstości strumienia ciepła [W/cm²K], ten sam błąd jest w legendzie wykresu z Rys. 4.9 oraz na wszystkich wykresach w Dodatku B, przy czym w podpisach rysunków jest [W/cm²];
 - nieścisłości merytoryczne:
 - sprawa dyskusyjna: czy termin *korelacja* nie powinien być zastąpiony *równaniem korelacyjnym* lub *równaniem kryterialnym*;
 - Autor pisze, że we wszystkich wzorach (w rozumieniu 1.8 – 1.32) wielkością charakterystyczną jest średnica oderwania pęcherza z równania (1.7), a w rzeczywistości przytaczane równania korelacyjne związane są albo z wymiarem charakterystycznym (kapilarnym) $\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}}$, albo ze średnicą z równania (1.7);
 - we wzorach (1.9) zamiast q w nawiasie kwadratowym powinno być g ;
 - wzór (1.8) jest dalej dwukrotnie powtarzany jako (1.16) i (1.23);
 - błędne odnośniki: w publikacji [16] nie ma zależności (1.29) i zależności na częstotliwość (następny wzór bez numeru), zależność Labuncowa w ww. publikacji jest podana w całkowicie odmiennej postaci niż wzór (1.32);

- omawiając publikację McGillisa i in. [37] Autor stwierdził, że badano m.in. wrzenie z powierzchni pokrytych sieczką z miedzi i tetrafluoroetenu (TFE); w rzeczywistości chodzi o dodatek do wrzącej wody kulek miedzianych lub z TFE, czyli Teflonu (w oryginale copper beads/TFE beads) – artykuł pochodzi z 1990 roku i w tym okresie skrót TFE odnosił się do Teflonu (PTFE, Politetrafluoroetylen);
- zależności na SOB (4.6) i SOW (4.7) na stronie 55 są identyczne, wzór (4.6) jest błędny;
- str. 83: patent nie dotyczył powierzchni TS, ale NTS ze spiekaną siatką;
- str. 86: średnica hydrauliczna dotyczy tuneli, a nie próbki;
- str. 100: δ_l we wzorach (6.6) i (6.10) nie oznacza średnicy menisku, tylko zastępczą wysokość trójkąta aproksymującego przekrój menisku;
- str. 102: błąd w podpisie Rys. 6.3 – powinno być 4 kPa;
- str. 83: termin *końcówki tuneli* powinien być zastąpiony terminem *wyloty tuneli*;
- najważniejsze uwagi dot. rysunków i ich podpisów:
 - mała czytelność wykresów na Rys. 4.4–4.6 – zbyt mała czcionka na opisach osi, jednostek i legendy; podobna uwaga dotyczy wszystkich rysunków w Dodatku A;
 - na wykresie Rys. 5.5 nie wiadomo, która linia odnosi się do ciśnień, a która dotyczy przegrzań;
 - w podpisie Rys. 5.12 nie opisano jaka próbka prezentowana jest na zdjęciu;
- bibliografia
 - nie ujednolicono formatowania, brak uporządkowania spisu literatury: raz pojawiają się pełne imiona, raz pierwsze litery imion z kropkami lub bez kropek;
 - w publikacjach angielskojęzycznych cały opis powinien być w języku angielskim;
 - ta sama publikacja figuruje jako pozycja [47] i [48];
 - niedopuszczalne jest podawanie tylko tytułu bez umieszczenia źródła, taka sytuacja występuje w poz. [15]: „Eurostat.Eurostat”;
 - błędy (literówki) w opisach publikacji (np. w [68]).

Zdaniem recenzenta, Doktorant winien odnieść się do następujących kwestii i ewentualnie wyjaśnić pewne nieścisłości, które pojawiły się w tekście:

1. W jaki sposób oszacowano straty ciepła do otoczenia w stanowisku opisanym w rozdziale 4? Czy \dot{q}_p i \dot{q} ze wzorów (4.2), (4.3) i (4.4) oznaczają tę samą wielkość?
2. Czy dokonano własnych pomiarów szerokości i głębokości tuneli oraz wysokości i grubości żeber dla powierzchni TS i NTS?
3. Autor na str. 72 stwierdza, że średnica odrywającego się pęcherza zależy od ciśnienia, a nie zależy od gęstości strumienia ciepła i rodzaju próbki. Skąd się wziął ten wniosek? Ponadto brak jest wykresu zmian średnicy odrywających się pęcherzy na powierzchni TS lub NTS w funkcji gęstości strumienia ciepła.
4. Autor na str. 75 pisze o dwóch okresach wrzenia. Czy ma na myśli okres oczekiwania i wzrostu pęcherza?
5. Dlaczego Autor nie podaje temperatury nasycenia cieczy wrzącej? Czy stosowano termoparę do pomiaru temperatury nasycenia bezpośrednio przy powierzchni próbki?
6. Autor pisze, że temperatura pary była mierzona (rozdział 5.1) – nigdzie jednak ta wartość nie jest podawana, a warto byłoby porównać ciśnienie odpowiadające zmierzonej temperaturze pary z odczytem ciśnienia z przetwornika.

7. Stwierdzony przez Autora liniowy wzrost częstotliwości przy wzroście gęstości strumienia ciepła jest raczej przybliżeniem (Rys. 5.32, 5.33). Na wykresie wskazane byłoby dodanie aproksymacji liniowej.
8. Stwierdzone w podrozdziale 5.1.2 duże błędy wyznaczenia gęstości strumienia ciepła metodą gradientową wymagają podania konkretnych wartości q , do których się odnoszą, a Autor pisze jedynie o małych i dużych gęstościach strumienia ciepła. Tak wysokie błędy wynikają przede wszystkim z niewielkiej odległości między termoparami, służącymi do wyznaczania q – z opisu w rozdziale 5.1 wynika, że było to 12 mm. Przy gęstościach strumienia ciepła nie przekraczających 60 kW/m^2 należałoby stosować co najmniej dwukrotnie większą odległość.
9. Autor powinien uzupełnić analizę niepewności pomiarowych dla stanowiska z rozdziału 5 o oszacowanie błędów wyznaczania współczynnika przejmowania (wnikania) ciepła oraz częstotliwości i średnicy odrywających się pęcherzy.
10. Dlaczego na wykresie (Rys. 5.33) częstotliwości dla powierzchni TS-1 są równe 0?
11. W modelu przedstawionym w podrozdziale 6.1.2 do obliczenia ciepła parowania z menisków cieczy wewnątrz tuneli potrzebna jest znajomość grubości warstwy nieodparowującej cieczy. W jaki sposób Autor wyznaczył tę wielkość?
12. Na rysunkach 6.2 i 6.3 są dwie krzywe oznaczające zapewne zależności teoretyczne $q(\Delta T)$, jednak nie zostały one opisane ani w legendzie, ani w podpisie rysunków. Proszę wyjaśnić ich znaczenie.

3. Ogólna ocena pracy

Mimo licznych drobnych uchybień w przygotowanej przez Doktoranta pracy, należy podkreślić, że Doktorant posiada wiedzę z zakresu wymiany ciepła podczas wrzenia przy obniżonym ciśnieniu, którą może wykorzystać w procesie optymalizacji zbięznika w adsorpcyjnym systemie trigeneracyjnym. W dotychczasowej literaturze przedmiotu można odnaleźć jedynie niewielką ilość publikacji dotyczących podobnych badań. Głównym nowatorskim elementem pracy jest sprawdzenie możliwości wykorzystania struktur tunelowych do zwiększenia współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia przy niskich ciśnieniach. Autor przeprowadził dokładne badania na powierzchniach płaskich, a swój staż we Francji wykorzystał do intensywnego rozwoju naukowego i uzyskania m.in. dobrej jakości badań eksperymentalnych i wizualizacyjnych przy wrzeniu na powierzchniach strukturalnych. 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.

Pragnę podkreślić, że praca jest przejrzysta, dobrze zredagowana, z właściwie dobranym materiałem ilustracyjnym.

4. Podsumowanie

Przedłożona do recenzji praca jest ciekawa i nowatorska. Przedstawione przez Doktoranta wyniki badań dotyczące procesu wrzenia na powierzchniach płaskich i strukturalnych przy obniżonym ciśnieniu są nie tylko obszernie, ale także wartościowe z punktu widzenia naukowego i aplikacyjnego oraz wnoszą pewne elementy oryginalności w modelowaniu tych zjawisk. W prowadzonych badaniach eksperymentalnych, przy opisie wyników badań oraz ich analizie Doktorant wykorzystał właściwe metody naukowe oraz wykazał dobrą znajomość zagadnień z zakresu wymiany ciepła. Wykazał także umiejętność współpracy z zagranicznym

ośrodkiem naukowym, co skutkowało zwiększeniem jakości przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Reasumując, uważam, że praca doktorska mgr. inż. Tomasza Hałona pt. *Optymalizacja parametrów procesu wrzenia ziębnika w niskociśnieniowym adsorpcyjnym systemie trigeneracyjnym* spełnia warunki określone w art. 13 ustawy *O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z 14.03.2003 r. z późniejszymi zmianami).

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana mgra inż. Tomasza Hałona do jej publicznej obrony.

