

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisławy Hałon nt.:

„Charakterystyka wysokotemperaturowego procesu wrzenia czynników chłodniczych w mikro kanałach”

Opinia została opracowana na zlecenie Prodziekana ds. ogólnych Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 16. 06. 2021 r. na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 9 czerwca 2021 r.

Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Zbigniew Królicki, zaś promotorem pomocniczym dr hab. inż. Bogusław Biało.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa zawiera 167 stron podzielonych na cztery, ponumerowane rozdziały oraz 4 rozdziały nie objętych numeracją, w tym:

1. **Wprowadzenie.** Opisano w nim potrzebę chłodzenia elementów generujących ciepło poprzez wykorzystanie najbardziej intensywnego sposobu wymiany ciepła, tzn. doprowadzenie do wrzenia cieczy, która chłodzi rozgrzaną powierzchnię. Wskazano przy tym, że istnieje potrzeba rozpoznania mechanizmów towarzyszących temu procesowi, które są ściśle związane z powstającą strukturą dwufazową płynu chłodzącego. Wskazano, na lukę informacyjną, jaką jest brak wiedzy w tym obszarze, gdy cieczą roboczą jest czynnik chłodniczy ulegający przemianie fazowej w temperaturze znacznie wyższej ($>40^{\circ}\text{C}$), niż to wynika z klasycznego zakresu temperatury parowania czynnika chłodniczego.
2. **Cel naukowy,** to krótki rozdział, w którym jasno przedstawiono cel naukowy pracy, jakim jest ustalenie dominującego mechanizmu wymiany ciepła podczas „wysokotemperaturowego” wrzenia czynnika chłodniczego w przepływie przez mikrokanal.
3. **Teza, cel, zakres i metody badań** to kolejny, krótki rozdział złożony z podrozdziałów, w których przybliżono kolejno w sposób szczegółowy: postawioną tezę pracy, cztery najważniejsze zdaniem Doktorantki cele badawcze pracy, przedmiot, zakres badań oraz metody badań zastosowane, w celu potwierdzenia postawionej tezy badawczej.
4. Rozdział 1 pracy zatytułowany **Wrzenie przy przepływie przez mini oraz mikro kanały – stan wiedzy** to obszerny rozdział, w którym na podstawie przeglądu literatury wyjaśniono kilka podstawowych pojęć. Dokonano przeglądu sposobów klasyfikacji kanałów oraz

wskazano podejście Kew i Cornwell'a jako podstawę do stwierdzenia, że wykorzystane w badaniach równolegle połączone kanały, o średnicy hydraulicznej $D_h = 1$ mm każdy, można uznać za mikrokanały. Opisano powstające na długości mikrokanalu struktury przepływu dwufazowego oraz ogólny mechanizmu wymiany ciepła towarzyszący określonej strukturze podczas wrzenia w przepływie. Kolejny obszerny podrozdział zawiera bardziej szczegółowy przegląd stanu wiedzy o mechanizmach wymiany ciepła i towarzyszących im strukturach przepływu dwufazowego. Omówiono, w jaki sposób, między innymi, średnica mikrokanalu, strumień masy, strumień ciepła, temperatura nasycenia czy stopień suchości czynnika chłodniczego powiązany jest ze strukturą przepływu dwufazowego, a przez to intensywnością wymiany ciepła wyrażaną przez współczynnik przejmowania ciepła. W kolejnym podrozdziale przybliżono znane z literatury sposoby modelowania współczynnika przejmowania ciepła podczas procesu wrzenia w przepływie. Modele podzielono na 4 grupy, zależnie od proponowanego przez twórców podejścia do obliczania współczynnika przejmowania ciepła w przepływie. Łącznie przeanalizowano 24 modele (których szczegółowy opis podano w Załączniku A) pod kątem ich zdolności do predykcji wyników badań eksperymentalnych uzyskanych przez autorów przytoczonych prac badawczych. Analizowano również wpływ zmiany stopnia odparowania czynnika chłodniczego na zmianę trendu krzywej opisującej dwufazowy współczynnik przejmowania ciepła. W podsumowaniu wskazano wpływ najważniejszych parametrów cieplnych, przepływowych i geometrycznych na wartość oraz trend charakterystyki - współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie od stopnia suchości mieszaniny dwufazowej.

5. Rozdział 2 pracy zatytułowany **Wrzenie pęcherzykowe**, to rozdział, którego trzy pierwsze podrozdziały mają charakter przeglądowy, zaś kolejne cztery zawierają opis badań własnych autorki pracy. Wszystkie poświęcone są wrzeniu w objętości.

W części przeglądowej Doktorantka zdefiniowała pojęcie wrzenia pęcherzykowego, opisała mechanizmy wymiany ciepła przy wrzeniu, przybliżyła siły działające na pojedynczy pęcherzyk parowy podczas jego wzrostu przy ogrzewanej ściance, opisała sposób wyznaczenia średnicy oderwania pęcherzyka parowego oraz częstotliwość odrywania pęcherzyków parowych w zależności od warunków cieplnych i własności fizycznych wrzącej cieczy. Szczegółowo opisano krzywą wrzenia, powiązano fragmenty krzywej z mechanizmem wymiany ciepła i odpowiadającą im strukturą wrzenia. Omówiono wpływ przegrzewu powierzchni ścianki, przechłodzenia cieczy, zwilżalności powierzchni oraz temperatury nasycenia na mechanizm wymiany ciepła.

W części poświęconej badaniom własnym przedstawiono opis stanowiska do badania wrzenia w objętości, w tym wykorzystaną aparaturę pomiarową, ocenę dokładności pomiaru oraz szczegółowo uzyskane wyniki badań własnych. Badania zrealizowano w zbiorniku o średnicy wewnętrznej 85 mm i wysokości 400 mm. W zbiorniku znajdowała się powierzchnia grzejna do której doprowadzono ciepło aż do uzyskania przemiany fazowej. Gęstość strumienia ciepła zmieniana była w zakresie 29,8-64,5 kW/m² co pozwoliło uzyskać temperaturę powierzchni grzejnej w zakresie 57,7-88,3°C. Badania realizowano dla różnych wartości ciśnienia w zbiorniku uzyskując temperaturę przemiany fazowej (temperaturę nasycenia) równą 39,6-70,3°C. Wyniki przedstawiono w formie charakterystyk. Do najistotniejszych należy zaliczyć charakterystyki wpływu gęstości strumienia ciepła, czy temperatury nasycenia na współczynnik przejmowania ciepła. Wyniki badań współczynnika przejmowania ciepła porównano z wynikami obliczeń według powszechnie stosowanych zależności. W przypadku jednej z nich (korelacja Rohsenova) zaproponowano własną wartość współczynnika korekcyjnego uzyskując dopasowanie wyników obliczeń do wyników badań eksperymentalnych współczynnika przejmowania ciepła. Uzyskano średni procentowy błąd (MPE) oraz średni procentowy błąd absolutny (MAPE) na poziomie kilku procent. Na koniec rozdziału zawarto wnioski własne oraz zaproponowano kierunki

dalszych badań oraz analiz odnośnie zjawiska wrzenia w objętości oraz korelacji do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła.

6. Rozdział 3 zatytułowany **Wrzenie w przepływie – eksperyment** jest kolejnym, obszernym oraz wartościowym rozdziałem recenzowanej pracy. Przedstawiono w nim wyniki badań własnych Doktorantki zrealizowanych podczas wrzenia czynnika chłodniczego R245fa w przepływie równolegle połączonymi mikrokanalami. W rozdziale opisano budowę stanowiska badawczego (w tym szczegółowo sekcji badawczej), wykorzystaną aparaturę pomiarową, metodę i zakres badań eksperymentalnych, metodę obróbki wyników pomiarów bezpośrednich oraz pośrednich. Wyznaczono niepewności pomiarów bezpośrednich oraz wielkości wyznaczanych pośrednio. Zależności do wyznaczenia niepewności każdej z obliczanych wielkości przedstawiono w załączniku. Badania zrealizowano podczas przepływu czynnika chłodniczego R245fa przez 10 równolegle połączonych mikrokanalów o średnicy hydraulicznej $D_h = 1$ mm każdy. Gęstość strumienia masy czynnika chłodniczego wynosiła odpowiednio 400, 700 i 1000 kg/(m²s). Czynnik dopływał do sekcji pomiarowej niedograny do temperatury nasycenia ($T_s = 49-82^\circ\text{C}$). Przechłodzenie wynosiło od 13 do 19 K. Dla każdego natężenia przepływu czynnika chłodniczego badania realizowano doprowadzając 30, 40 i 50 kW ciepła na każdy m² powierzchni grzejnej. Właściwa sekcja badawcza posiadała transparentną pokrywę umożliwiającą obserwację struktury dwufazowej wrzącego czynnika chłodniczego. Przed badaniami właściwymi współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie zrealizowano badania podczas jednofazowego przepływu czynnika chłodniczego. Badania te pozwoliły oszacować straty ciepła z sekcji badawczej do otoczenia. Badania właściwe współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie realizowano w sposób umożliwiający dokonanie analiz wpływu gęstości strumienia masy, gęstości strumienia ciepła, temperatury nasycenia, stopnia suchości pary, struktury przepływu dwufazowego na współczynnik przejmowania ciepła. Uzyskane na podstawie danych eksperymentalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła porównano z wynikami obliczeń współczynnika przejmowania ciepła według omówionych w Rozdziale 1 dwudziestu czterech korelacji. Wskazano trzy z nich, dla których średni procentowy błąd absolutny nie przekracza 25%, jako zalecane do stosowania.
7. Rozdział 4 - **Wrzenie w przepływie – modelowanie** to kolejny, rozdział pracy doktorskiej o dużej wartości naukowej. W rozdziale tym zaproponowano autorska zależność do obliczania współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia czynników chłodniczych w przepływie mikrokanalami. Zaproponowana korelacja bazuje na podejściu addytywnym w którym współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie jest sumą współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia w objętości z odpowiednią poprawką (współczynnik tłumienia) i współczynnika przejmowania ciepła podczas konwekcji wymuszonej z odpowiednią poprawką (współczynnik wzmocnienia). Jako najbardziej właściwą do modyfikacji uznano korelację zaproponowaną przez Saitoha, która w dotychczasowych analizach dawała przybliżała wyniki badań eksperymentalnych ze średnim procentowym błędem absolutnym dochodzący do 80%. Doktorantka zaproponowała zmiany w modelu polegające na wykorzystaniu zależności Krużylina, jako właściwej do obliczania współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu, równania Dittusa-Boeltera do wyznaczenia konwekcyjnego współczynnika przejmowania ciepła niezależnie od liczby Re, własnych korelacji do wyznaczenia współczynników poprawkowych modelu. Wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie uzyskane z własnego modelu porównano z własnymi danymi eksperymentalnymi oraz danymi eksperymentalnymi z literatury. Stwierdzono pozytywny wpływ własnych modyfikacji modelu na wyniki obliczeń co potwierdza, między innymi, znacznie obniżona wartość procentowego średniego błędu absolutnego.

8. Kolejny rozdział pracy, to **Podsumowanie**. W rozdziale zebrano i przedstawiono syntetycznie kilkanaście wniosków wynikających z przeprowadzonych analiz badań eksperymentalnych własnych i zebranych w przeglądzie literatury oraz wskazano kierunki działań zmierzających do pogłębienia wiedzy na temat badania oraz modelowania wysokotemperaturowego wrzenia czynników chłodniczych w przepływie przez mikrokanały.

Dodatkowo w pracy zawarto bibliografię, wykazy użytych oznaczeń, tabel i rysunków oraz publikacji, których Doktorantka jest współautorką.

2. Teza pracy

Tezy badawcze postawione w pracy Doktorantka sformułowała jako:

„Dla wysokotemperaturowego wrzenia w mikro kanałach dominującym mechanizmem wymiany ciepła jest wrzenie pęcherzykowe. Mechanizm ten przeważa niezależnie od struktury przepływu występującej w kanale.

W warunkach podwyższonej temperatury wzrost wartości współczynnika wnikania ciepła można uzyskać poprzez zwiększenie temperatury nasycenia oraz gęstość strumienia ciepła przy jednoczesnym zmniejszeniu prędkości czynnika.”

W wielu źródłach można znaleźć definicję, iż teza to założenie w formie twierdzącej (niezależnie od postawionych w nim uwarunkowań), które może dotyczyć istnienia nieznanego, lub nie w pełni rozpoznanego zjawiska i jest głównym przesłaniem pracy. Przebieg całej treści pracy badawczej powinien zmierzać do jej udowodnienia, tzn. pozytywnego zweryfikowania albo obalenia. Ponieważ nie trzeba udowadniać rzeczy oczywistych, to stwierdzenie oczywiste nie stanowi tezy. Zgodnie z przytoczoną definicją można stwierdzić, że tezy postawione w treści pracy sformułowano prawidłowo, a opisane problemy naukowe wymagają wnikliwych analiz. W celu weryfikacji postawionych tez, zdaniem Doktorantki, należy zrealizować szeroko zakrojone badania eksperymentalne, które pozwolą:

1. określić wpływ gęstości strumienia masy, gęstości strumienia ciepła oraz temperatury nasycenia (powyżej 40°C) na intensywność wymiany ciepła podczas wrzenia czynnika chłodniczego w przepływie przez mikrokanały,
2. zidentyfikować dominujący mechanizm wymiany ciepła występujący podczas w/w badań,
3. rozpoznać struktury przepływu dwufazowego występujące podczas w/w badań (opracować mapy struktur przepływu),
4. ocenić, czy istnieje związek między strukturą przepływu, a dominującym mechanizmem wymiany ciepła.

3. Rozwinięcie tezy

Prezentowana rozprawa doktorska dotyczy badania dominującego mechanizmu wymiany ciepła podczas wrzenia czynnika chłodniczego w przepływie przez mikrokanały w przypadku, gdy przemiana fazowa zachodzi w temperaturze znacznie przekraczającej temperaturę odparowania w tradycyjnych urządzeniach chłodniczych i klimatyzacyjnych. Konieczność odprowadzenia znacznych ilości ciepła z małych powierzchni czasami wiąże się z koniecznością realizacji wymiany ciepła w zakresie wartości temperatury przekraczającej temperaturę otoczenia. W krajach leżących w strefie gorącego klimatu, czy w pomieszczeniach typu serwerownie

obniżenie temperatury powietrza w otoczeniu urządzeń elektronicznych może być niewystarczające do prawidłowego ich chłodzenia. Wówczas istnieje konieczność bezpośredniego odbioru ciepła od układów je generujących. Koncepcja wysokotemperaturowej przemiany fazowej do bezpośredniego chłodzenia różnych elementów stała się oczywistym kierunkiem zainteresowań naukowców. W pierwszych rozdziałach swojej rozprawy Doktorantka dokonuje obszernej analizy źródeł literaturowych w tym zakresie. Przywołuje najnowszą, nieliczną literaturę dotyczącą wysokotemperaturowego wrzenia czynników chłodniczych podczas przepływu w mikrokanalach. Na uznanie zasługuje fakt, że gdy zjawiskom opisywanym w literaturze towarzyszą odmiennie zachowania Doktorantka przybliżyła nie tylko zaistniały fakt, ale wyjaśnia przesłanki zajścia odmiennych zachowań starając się pogrupować je pod względem przyczynowo-skutkowym. Doktorantka konkluduje, że dostępne w literaturze dane, dotyczące analizy mechanizmów wymiany ciepła podczas wysokotemperaturowego wrzenia czynników chłodniczych w przepływie przez mikrokanaly są niedostatecznie rozpoznane, a czasami wzajemnie sprzeczne.

Z wyżej wymienionych powodów autorka zaproponowała własne kierunki badawcze oraz przeprowadziła liczne, systematyczne badania wymiany ciepła podczas wysokotemperaturowego wrzenia czynnika chłodniczego w czasie przepływu przez mikrokanaly.

Badania prowadzono na dedykowanym stanowisku badawczym. Jego sekcja badawcza składała się z wymiennika ciepła (miedzianego bloku), gdzie przepływający przez 10 równoległe połączonych mikrokanalów czynnik chłodniczy ulegał przemianie fazowej. Źródłem ciepła były umieszczone w bloku wymiennika grzałki elektryczne. Regulując natężenie przepływu czynnika chłodniczego, moc elektryczną grzałek, ciśnienie w obiegu czynnika chłodniczego oraz temperaturę ciekłego czynnika na wejściu do wymiennika możliwe było eksperymentalne wyznaczenie wpływu gęstości strumienia masy, gęstości strumienia ciepła oraz temperatury nasycenia na współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia czynnika w mikrokanale. Dodatkowo, transparentna pokrywa wymiennika ciepła umożliwiała obserwowanie struktur przepływu dwufazowego, które można było powiązać z lokalnym stopniem suchości mieszaniny dwufazowej. W efekcie eksperymentalne wartości współczynnika przejmowania ciepła można było skorelować z wielkościami cieplno-przepływowymi. Wyniki badań zestawiono w formie charakterystyk. Przeanalizowano wpływ wybranych parametrów na uzyskane wartości, a na tej podstawie wyciągnięto wnioski.

Zrealizowane badania eksperymentalne oraz analiza wyników badań wskazują, że postawione przez Doktorantkę tezy zostały pozytywnie zweryfikowane.

4. Oryginalność pracy

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej oraz kierunek badań jest zbieżny z obserwowanym postępowaniem technologicznym. Konieczność odprowadzania dużych ilości ciepła z ogrzewanych powierzchni, których temperatura obniżona w wyniku przemiany fazowej cieczy chłodzącej wciąż osiąga wartości wyższe niż temperatura otoczenia jest dotychczas pomijanym wątkiem badań wymiany ciepła. Mając powyższe na uwadze Doktorantka opracowała koncepcję wielowariantowych badań z wykorzystaniem wymiennika ciepła w postaci bloku w którym znajduje się sieć równoległych mikrokanalów. O ile wymienniki ciepła na bazie kanałów konwencjonalnych oraz minikanalów były obiektem licznych badań, to wykorzystanie mikrokanalowych wymienników ciepła i dodatkowo prowadzenie procesu wymiany ciepła z przemianą fazową w temperaturze powyżej 40°C jest nowym kierunkiem badawczym wymagającym usystematyzowania. Usystematyzowanie staje się możliwe, gdy dostępna jest dostatecznie duża baza wyników badań eksperymentalnych, które jednoznacznie potwierdzają wpływ wybranych parametrów cieplnych, przepływowych, konstrukcyjnych i materiałowych na intensywność

procesu wymiany ciepła. Wszelkie wyniki poszerzające istniejącą bazę danych eksperymentalnych oraz metody zmierzające do uogólnienia informacji o możliwościach intensyfikacji wymiany ciepła w wymiennikach ciepła są źródłem zainteresowań specjalistów z zakresu termodynamiki i techniki cieplnej. Recenzowana praca idealnie wpisuje się w aktualny nurt badawczy, a kompleksowe podejście nadaje jej, w mojej ocenie, wysokiej wartości naukowej.

Ważnym, oryginalnym aspektem recenzowanej rozprawy jest zaproponowanie przez Doktorantkę własnych poprawek do korelacji Saitoha, dzięki którym znacznie obniżono wartość procentowego średniego błędu absolutnego przy obliczaniu domniemanej wartości współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia czynnika chłodniczego w wymiennikach będących siecią równoległych mikrokanałów umieszczonych wewnątrz metalowego bloku.

Ze względu na wielowątkowy charakter recenzowanej pracy można stwierdzić, że opisano w niej wiele aspektów, które zasługują na miano oryginalnych. Wśród najważniejszych należy wymienić: nowe wyniki badań z wykorzystaniem oryginalnego wymiennika ciepła, zrealizowanie badań w zakresie zmian parametrów rzadko spotykanych w literaturze, zaproponowanie własnej korelacji do obliczania współczynnika przejmowania ciepła podczas wysokotemperaturowego wrzenia czynnika chłodniczego w mikrokanałach.

5. Wartości poznawcze pracy

Przedstawiona rozprawa doktorska prezentuje wyniki wielowariantowych badań eksperymentalnych zrealizowanych na dedykowanym stanowisku laboratoryjnym. Badania zrealizowano podczas przepływu czynnika chłodniczego R245fa przez mikrokanały o średnicy hydraulicznej $D_h = 1$ mm. Gęstość strumienia masy czynnika chłodniczego wynosiła odpowiednio 400, 700 i 1000 kg/(m²s). Gęstość strumienia ciepła wynosiła 30, 40 i 50 kW/m². Temperatura nasycenia odpowiadająca temperaturze przemiany fazowej zmieniana była w zakresie $T_s = 49$ -82°C. Badania wymiany ciepła zrealizowano podczas przepływu jednofazowego, wrzenia przechłodzonego oraz wrzenia rozwiniętego. Dodatkowo, transparentna pokrywa mikrokanalowego wymiennika ciepła pozwalała na obserwację i rejestrację struktur przepływu.

W efekcie przeprowadzonych badań możliwe było sporządzenie licznych charakterystyk, na podstawie których możliwe stało się przeanalizowanie wpływu:

- stopnia suchości wrzącego czynnika roboczego na intensywność procesu wymiany ciepła – współczynnik przejmowania ciepła,
- gęstości strumienia masy na współczynnik przejmowania ciepła,
- gęstości strumienia ciepła na współczynnik przejmowania ciepła,
- wpływu temperatury nasycenia na współczynnik przejmowania ciepła,
- porównanie współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie ze współczynnikiem przejmowania ciepła podczas wrzenia w objętości,
- wizualizacja struktur przepływu dwufazowego na długości mikrokanalu dla indywidualnych parametrów eksperymentu,
- określenie wpływu parametrów cieplnych i przepływowych na struktury przepływu dwufazowego,
- ocena związku między strukturą przepływu, a dominującym mechanizmem wymiany ciepła.

W efekcie badań własnych uzyskano wskazówki do kolejnych badań, z których słusznie, za najważniejsze uznano między innymi:

- określenie krytycznej liczby Re przy której laminarny przepływ w mikrokanałach przechodzi w przepływ burzliwy, gdyż proces wymiany ciepła zależy silnie od charakteru ruchu płynu;

- dokonanie szczegółowych pomiarów wartości lokalnego ciśnienia wzdłuż mikrokanalu, gdyż założenie a priori liniowego spadku wartości ciśnienia podczas wrzenia w przepływie mija się z prawdą i ma wpływ na obliczane, lokalne parametry termofizyczne płynu;
- prowadzenie kolejnych eksperymentów w zakresie parametrów zaproponowanych przed Doktorantką, lecz z wykorzystaniem wymienników ciepła o innej, lub zbliżonej geometrycznie konstrukcji celem jednoznacznego potwierdzenia uzyskanych zależności;
- opracowanie nowych lub modyfikacji istniejących modeli do wyznaczania współczynników wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie w mikrokanałach zarówno w warunkach wysokotemperaturowych oraz konwencjonalnych.

6. Wartość aplikacyjna pracy

Ciągły wzrost kosztów energii i materiałów konstrukcyjnych oraz konkurencja na rynku gotowych wyrobów wymuszają konieczność projektowania i budowy wysokosprawnych urządzeń wymiany ciepła, które są w stanie odebrać narastające z postępem technologicznym strumienie ciepła, a przy tym ich gabaryty powinny być coraz mniejsze. Pociąga to za sobą konieczność poszukiwania nowych sposobów intensyfikacji wymiany ciepła. Prezentowana rozprawa doktorska wpisuje się w ten priorytetowy trend badań. Rozpoznanie metody intensyfikacji wymiany ciepła przez zmianę parametrów procesu może być z powodzeniem wykorzystane przez konstruktorów oraz producentów tych urządzeń. Uzyskanie wzrostu wartości współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie pozwala projektować miniaturowe urządzenia wymiany ciepła pracujące w zakresie temperatury pracy klasycznych urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych, jak i temperaturze wyższej, ale umożliwiającej bezawaryjną pracę urządzeń elektronicznych.

Niniejsza praca daje podwaliny do opracowania technologii wytwarzania wymienników na bazie mikrokanalów pracujących w temperaturze przemiany fazowej czynnika chłodniczego powyżej 40°C oraz daje możliwość teoretycznego wyznaczenia wartości współczynnika przejmowania ciepła w mikrokanałach takiego wymiennika, a przez to ocenę intensywności wymiany ciepła urządzenia oraz określenie wpływu wybranych parametrów cieplnych i przepływowych na tę intensywność.

7. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. Doktorantka używa pojęcia temperatury nie uszczegółowiając, którą ma na myśli. Trudno więc czasami określić się czy chodzi o temperaturę: nasycenia, otoczenia, ścianki, płynu w rdzeniu przepływu, lokalną, chwilową, średnią, itd. Na przykład str. 5 pierwszy z celów badawczych to: „Określenie wpływu gęstości strumienia masy i ciepła oraz temperatury na intensywność wymiany ciepła...”.
2. Podręczniki z termodynamiki, oraz z wymiany ciepła nie definiują pojęcia „zimno”. Sformułowanie (str. 10, w 10-11) „...kontaktu z zimniejszą cieczą.” jest błędem merytorycznym.
3. Na rys. 1.3 przedstawiono, między innymi, rozkład temperatury płynu wzdłuż kanału. W domyśle chodzi o temperaturę płynu w rdzeniu przepływu. Wiadomym jest, że gdy w rdzeniu przepływu występuje struktura dwufazowa, temperatura płynu odpowiada temperaturze nasycenia, a ona zależy od lokalnego ciśnienia. Ponieważ zakłada się liniowy spadek ciśnienia na długości kanału, wówczas temperatura nasycenia nieznacznie spada na długości kanału. W związku z tym, błędnie narysowano dla dwufazowej struktury mgłowej

wzrost temperatury płynu. Wzrasta ona dopiero od miejsca, gdzie struktura dwufazowa przejdzie w jednofazową (parę suchą, a następnie przegrzaną).

4. Na rys. 1.12 punkt ONB oznaczający rozpoczęcie wrzenia pęcherzykowego i powinien on być w miejscu, gdzie przepływ jednofazowy przechodzi we wrzenie pęcherzykowe.
5. Podana przez Doktorantkę definicja wrzenia (str. 52, w₄₋₅) odbiega od standardowych definicji, a poza tym przez brak uściślenia występujących w niej pojęć myląca.
6. Na str. 55, w₃ podano, że chodzi o zrównanie „...siły bezwładności z siłą napięcia powierzchniowego...”. Powinno być: ...siły wyporu z siłą napięcia powierzchniowego....
7. Na str. 89, na podstawie badań eksperymentalnych wyznaczono współczynnik przejmowania ciepła podczas przepływu jednofazowego. Wyniki badań porównano z wynikami obliczeń według znanych korelacji. Okazało się, że wartości eksperymentalne mogą być nawet 185% większe od wartości teoretycznych. Doktorantka uzasadnia ten fakt tym, że wykorzystane zależności stosowane dla kanałów konwencjonalnych mają ograniczone stosowanie w przypadku mikrokanalów. Zdaniem recenzenta w badanych mikrokanalach (jak i w każdego typu kanale) najpierw występowała strefa rozbiegu hydraulicznego oraz termicznego. W strefie tej wartości współczynnika przejmowania ciepła od teoretycznie nieskończenie dużych maleją do stałej wartości, jaka występuje w strefie ustabilizowanej termicznie. Wzory przyjęte przez Doktorantkę do obliczeń teoretycznych dotyczą strefy ustabilizowanej termicznie stąd mogą dawać wyniki zaniżone.
8. Na stronie 97, w₇ – Doktorantka użyła niespotykanego w literaturze polskojęzycznej sformułowania „kłębiąca” mając na myśli jedną ze struktur przepływu dwufazowego (churn). Zazwyczaj używane jest określenie wzburzona, zmieszana, itp.

Uwagi edytorskie

Przedstawiony tekst został starannie przygotowany, lecz można napotkać w nim drobne niedociągnięcia. Z częstotliwości występowania niektórych z nich wynika, że jest on przyjętą przez Doktorantkę nieświadomie niepoprawną regułą. Przykładowo:

- znaki interpunkcji na końcu każdego z wyliczanych elementów, to: przecinek, średnik lub kropka. Obowiązują reguły, kiedy i jaki znak powinno się stosować. Doktorantka tych reguł nie przestrzega. Np. na str. 8 tekst wypunktowany powinien posiadać przecinki na końcu każdej linii i bezwzględnie kropkę w ostatnim wierszu. Na str. 14, gdyby przyjęc za Doktorantką, że na końcu każdego wypunktowania powinny być postawione kropki to tekst w kolejnych wypunktowaniach powinien zaczynać się z wielkiej litery;
- wzór jest częścią tekstu, więc gdy wzór kończy zdanie powinno się po nim postawić kropkę. Słusznie wówczas kolejne zdanie rozpoczyna się z wielkiej litery. Gdy wzór znajduje się w środku zdania, stawia się po nim przecinek i dalszą część zdania kontynuuje z małej litery od początku linii. Te reguły złamane są w praktycznie każdym przypadku użycia przez Doktorantkę wzoru;
- terminu „temperatura” używa się w liczbie pojedynczej, gdyż w danym miejscu i chwili mamy do czynienia z jedną temperaturą. Nawet jeśli jest mowa o licznych wystąpieniach to przykładowe sformułowanie „temperatura w punktach” jest bardziej właściwe niż „temperatury w punktach”;
- w pracach naukowych przyjęto pisać o faktach dokonanych, czyli w czasie przeszłym. Doktorantka nagminnie używa czasu teraźniejszego, a nawet przyszłego, np.: str. 25, w¹ – „Stopnie suchości obejmują zakres ...”, str. 48, w₉ – „Skoro dominować będzie ...”, str. 51, w⁸ – „...zostanie następnie wykorzystana ...”, rozdział 3.1.1 – „jest”, „ma”;
- nagminnie rysunki są daleko poza miejscem, gdzie się je omawia. Powinny znajdować się, bezpośrednio po, lub jak najbliżej miejsca w którym zostały przywołane. Dochodzi do absurdalnych sytuacji, że rysunek o którym jest mowa w jednym rozdziale znajduje się w rozdziale poświęconym innej tematyce. Np.: rys. 2.3 przywoływany jest na str. 57

w rozdziale poświęconym mechanizmom wymiany ciepła przy powstającym pęcherzyku parowym, a rysunek znajduje się na str. 58, gdzie już w kolejnym rozdziale opisywane są parametry termodynamiczne, które wpływają na proces wrzenia pęcherzykowego. Przywołanie rys. 3.20 znajduje się na stronie 101, gdy sam rysunek znajduje się trzy strony dalej.

Dodatkowo zauważono braki edytorskie nie stanowiące reguły edytorskiej przyjętej przez Doktorantkę lecz pojedyncze przypadki. Są to:

- str. ix – Spis treści zawiera wykaz rozdziałów i podrozdziałów. Tworzenie podrozdziału 1.4.1, gdy nie ma już kolejnych podrozdziałów jest błędem. Jest to niczym „dokonanie podziału na jeden element”;
- str. 4, w_2 – „...wrzenie w przepływie charakteryzuje się korzystną charakterystyką...”;
- tylko w Rozdziale 4 Doktorantka przywołując autorów publikacji używa pogrubionej czcionki;
- str. 26 - tabela 1.1 jest nieczytelna. Podobnie rys. 1.15, tabela 1.3;
- występują wolne znaki „i”, „z” itp. na końcu linii. Są to tzw. sieroty i powinno się je poprzez spację nierozłączną „przykleić” do wyrazu występującego w kolejnej linii (np.: str. 35).

8. Uwagi końcowe

Warunkiem dysertabilności rozprawy doktorskiej jest jej związek z problemem poznawczym bezpośrednio lub pośrednio wpływającym na stan wiedzy. Związek ten powinien umożliwić „młodym naukowcom” dogłębne poznanie metodologii badań oraz stworzenie podstaw do dalszego rozwoju w kierunku osiągnięcia pełnej samodzielności naukowej. W przypadku recenzowanej rozprawy warunki te zostały spełnione. Rozprawa napisana jest poprawnie, gdyż występują w niej elementy, które w metodologii nauk ścisłych określa się jako etapy badania naukowego.

Przedstawioną do oceny rozprawę oceniam jako pracę wartościową, zawierającą bardzo bogaty, interesujący poznawczo materiał badawczy. Podsumowując stwierdzam, że rozprawa Pani mgr inż. Stanisławy Hałon:

- potwierdza jej bardzo wysoki poziom wiedzy w obszarze materiałoznawstwa, mechaniki płynów, termodynamiki oraz wymiany ciepła stanów ustalonych,
- stanowi oryginalne osiągnięcie poprzez rozwiązanie wielu nowych, aktualnych tematycznie zagadnień naukowych,
- wykazuje umiejętność Doktorantki do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Podane w recenzji uwagi krytyczne mają charakter informacyjny. Uwagi te nie pomniejszają wartości naukowej opiniowanej pracy, którą pod kątem merytorycznym oceniam bardzo wysoko. Wyniki przeprowadzonych badań zyskały również uznanie recenzentów międzynarodowych, o czym mogą świadczyć liczne artykuły Doktorantki opublikowane w czasopismach o najwyższej randze naukowej.

9. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorantka wykazała się umiejętnością rozwiązywania problemów badawczych przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazała także umiejętność wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu szeroko rozumianej energetyki cieplnej przy prowadzeniu badań eksperymentalnych i ich opracowaniu. Praca stanowi olbrzymi, oryginalny wkład do badań nad problemem intensyfikacji wymiany ciepła w mikrokanałach. Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Stanisławy Hałon jako rozprawy doktorskiej spełniającej wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku i dopuszczeniu jej do publicznej obrony.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę bardzo szeroki zakres rozprawy, istotny wkład Doktorantki w postęp wiedzy na temat możliwości wykorzystania wysokotemperaturowego wrzenia czynników chłodniczych w mikrokanałach oraz umiędzynarodowienie uzyskanych wyników badań wnioskuję o jej wyróżnienie.

