

prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielwicz, prof. zw. PG
Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki i Aparatury Przemysłowej
Zakład Systemów i Urządzeń Energetyki Ciepłej
80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12
tel. +58 347 2254
email: Dariusz.Mikielwicz@pg.gda.pl

Gdańsk, 10 maja 2018 r.

W P Ł Y N Ę Ł O

dnia 24.05.2018
72/10717/7/102/2018

R E C E N Z J A

pracy doktorskiej mgr. inż. Marcina KRUZLA pt.

"Modelowanie skraplania czynnika chłodniczego w pionowym mini kanale rurowym"

Poniższa recenzja została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej w oparciu o pismo z dnia 18 kwietnia 2018 roku.

Praca została wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Tadeusza Bohdala, a promotorem pomocniczym była dr inż. Małgorzata Sikora.

1. Przedmiot rozprawy

Opiniowana praca pod tytułem „Modelowanie skraplania czynnika chłodniczego w pionowym mini kanale rurowym ” dotyczy analizy wybranych problemów związanych z projektowaniem kompaktowych skraplaczy chłodniczych, w których kondensacja odbywa się w mini i mikrokanalach. W takiej sytuacji zmniejszanie wymiarów przekroju kanału przepływowego wraz z występowaniem przemiany fazowej, intensyfikującej wymianę ciepła, prowadzi do zmniejszenia wymiarów wymiennika, kosztem wzrostu spadku ciśnienia potrzebnym do przetłoczenia czynnika przez kanał. Do przedstawionej analizy wykorzystano obszerną wiedzę literaturową z zakresu wymiany ciepła i masy w przepływach dwufazowych, jak również własne badania eksperymentalne.

Praca składa się z dwóch części, pierwszej, wprowadzającej czytelnika w dotychczasowy stan wiedzy zagadnień związanych z czynnikami energetycznymi, przepływem czynnika chłodniczego, oporami przepływu, mechanizmami skraplania. W drugiej części przedstawiono hipotezy, zakres i cel pracy, badania eksperymentalne, wyniki tych badań oraz próbę modelowania oporów przepływu podczas skraplania, podsumowanie i wnioski. Praca liczy łącznie 219 stron, z czego na część pierwszą, wprowadzającą do tematyki pracy, przypadają 63 strony. Praca zawiera 8 rozdziałów, bibliografię oraz załączniki w objętości 62 stron. Literatura wykazana jest w łącznej liczbie 181 pozycji, z czego 5 jest współautorstwa Doktoranta.

We **wstępnym rozdziale** do pracy czytelnik wprowadzony jest do tematyki pracy. Autor przekonuje, że liczne gałęzie przemysłu oczekują w najbliższym czasie zminiaturyzowanych urządzeń, wśród których typuje wymienniki z przemianą fazową, jako te, które staną się szeroko stosowane w nieodległej przyszłości. Argumentuje, że zmniejszenie wymiarów kanałów w sposób bezpośredni przyczynia się do zwiększenia współczynnika przejmowania ciepła, a przemiana fazowa typu skraplanie jeszcze bardziej ją poprawia.

W rozdziale drugim omawia mechanizm procesu skraplania, przedstawiając różnice między kondensacją homogeniczną i heterogeniczną, omawia struktury przepływu podczas kondensacji w przepływie oraz kryteria przejścia jednej struktury w drugą. Omawia mapy przepływu. Następnie skupia uwagę na charakterystyce czynników chłodniczych. Przedstawia kryteria ich oceny, omawia wskaźniki destrukcyjnego ich wpływu na otoczenie. Na koniec rozdziału przedstawia klasyfikację kanałów ze względu na ich średnicę. Kandydat przedstawia także przegląd prac związanych z badaniami i modelowaniem oporów przepływu oraz wymianą ciepła podczas skraplania w kanałach okrągłych. Zauważa, że pomimo bardzo obszernej literatury występuje stosunkowo niewiele jest w niej badań skraplania w kanałach pionowych oraz przy niskich gęstościach strumienia ciepła. W mojej opinii nieco nieszczęśliwie zatytułował te sekcje jako wybrane problemy wymiany ciepła i oporów przepływu, gdzie koncentruje się przede wszystkim na ogólnym przedstawieniu badań procesu wrzenia.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawia genezę, cel i zakres pracy. Formuluje hipotezy badawcze.

Rozdział czwarty dotyczy eksperymentalnych badań własnych przeprowadzonych przez Doktoranta. Omówione jest specjalnie w tym celu zaprojektowane i wykonane stanowisko pomiarowe oraz metodyka prowadzenia badań. Praca zyskałaby wiele, gdyby Autor bardziej szczegółowo opisał procedurę wyznaczania lokalnej temperatury powietrza. Podczas eksperymentu temperatura powietrza odbierającego ciepło podczas kondensacji czynnika zmienia się istotnie i bardzo ważnym jest określenie sposobu jego zmienności. Podobne wątpliwości dotyczą wyznaczania lokalnego współczynnika przejmowania ciepła, który jest funkcją lokalnej temperatury nasycenia czynnika roboczego. Wyznaczenie lokalnej temperatury nasycenia jest również kwestią, której Autor nie poświęcił uwagi przy redakcji pracy. Spadki ciśnienia występujące w eksperymencie dochodzą do 100kPa. W takich przypadkach lokalna temperatura nasycenia będzie się także zmieniała, wpływając na wartość współczynnika przejmowania ciepła. Nie można też przyjąć, że będzie się ona zmieniała w sposób liniowy. Stosowne wyjaśnienia w tych kwestiach będą niezbędne do ustalenia poprawności procedury redukcji danych eksperymentalnych.

Rozdział piąty przedstawia wyniki badań eksperymentalnych spadków ciśnienia oraz współczynników przejmowania ciepła w rurce minikanalowej dla trzech czynników chłodniczych, tj. R404A, R407C oraz R410A. Przebadany został duży zakres zmienności masowego natężenia przepływu oraz przyłożonego strumienia ciepła dla 6 średnic kanału. Doktorant pokusił się także o identyfikację struktur czynnika roboczego wg kryteriów zaproponowanych przez innych autorów. Swoje badania przedstawił w postaci graficznej oraz tabelarycznej. Postać graficzna jest zdecydowanie bardziej przemawiająca do czytelnika, także uważam, że tabele pomiarowe powinny się znaleźć w całości w załącznikach. W obecnej formie pracy zamieszczenie tabel zakłóca płynne zapoznawanie się z treścią pracy. Dodatkowo, w tabelach zawarty jest błąd prezentacji danych eksperymentalnych. Dotyczy on wartości ciśnienia nasycenia. W tabelach 5.1-5.3, 5.5-5.7, 5.9-5.11 oraz 5.13-5.15, jak również w tabelach w załącznikach jednostka ciśnienia nasycenia jest wyrażona w kPa, podczas gdy wartości ciśnienia nasycenia dotyczą barów. Powstaje pytanie, czy jest to jedynie błąd przedstawienia składowych pomiarów, czy też dotyczy on także obliczeń. W tabelach występuje również błąd w przedstawieniu jednostek dla współczynnika przejmowania ciepła.

Autor przedstawia zależności spadku ciśnienia w funkcji masowego natężenia przepływu dla różnych średnic kanałów. Wprowadza przy tym linie trendu, które w mojej opinii nie powinny się przecinać, jak to ma miejsce na rysunkach 5.1. Z kolei na rys. 5.2 pokazuje zależności zmian spadku ciśnienia w funkcji strumienia masy dla dwóch ekstremalnie różniących się średnic kanału. Zdecydowanie lepiej obrazowany byłby ten wpływ gdyby wyniki przedstawione były dla każdego z płynów na jednym rysunku. Wątpliwości z rys. 5.1 przeniesione są na rys. 5.3. Pokazane są tutaj linie trendu wynikające z danych

eksperymentalnych. Przedstawione linie trendu wynikają z aproksymacji matematycznych, niemniej nie odzwierciedlają fizyki zjawiska. Nie powinny się one przecinać. Na kolejnych wykresach przedstawione są charakterystyki spadku ciśnienia w funkcji stopnia suchości, które nie budzą zastrzeżeń. Z kolei znowu przedstawienie wyników na rys. 5.5 powinno odbyć się na jednym wykresie, gdyż wówczas zdecydowanie lepiej widać byłoby wpływ czynnika na spadek ciśnienia. Na rys. 5.6 i 5.7 przedstawiono zależności spadku ciśnienia w funkcji średnicy mini kanału, które pokazują wpływ czynnika na spadek ciśnienia przy stałej wartości gęstości strumienia masy oraz przy stałej wartości stopnia suchości. Dyskusja tych wyników jest zadowalająca. Autor przyznaje, że w analizie składowych spadku ciśnienia nie uwzględniono członu przyspieszeniowego. Interesujące byłoby przedstawienie udziału procentowego tego składnika. Na kolejnych wykresach przedstawia wykresy średniego współczynnika przejmowania ciepła w funkcji gęstości strumienia masy i lokalnego współczynnika przejmowania ciepła w funkcji stopnia suchości. Interesujące są rozkłady współczynnika przejmowania ciepła w funkcji średnicy kanału. Następnie Doktorant porównał uzyskane przez siebie wyniki z korelacjami opisującymi spadek ciśnienia przez innych autorów. W porównaniach tych uzyskał dużą rozbieżność z korelacjami empirycznymi. Podkreśla fakt, że większość danych eksperymentalnych została przeprowadzona przy zdecydowanie większych gęstościach strumienia ciepła, gdyż z reguły woda była czynnikiem odbierającym ciepło od czynnika roboczego.

W rozdziale szóstym W tym świetle przedstawił własną postać korelacji opisującej opory przepływu podczas skraplania oraz współczynnik przejmowania ciepła, które charakteryzują się najlepszym dopasowaniem do własnych danych eksperymentalnych. Rzeczywiście uzyskana dokładność predykcji jest największa spośród rozpatrywanych korelacji. Ogólnie przyjętym jest uwzględnianie w takich przypadkach wpływu napięcia powierzchniowego, które jest dominujące w mini i mikrokanalach. Przedstawione korelacje nie zawierają tego składnika. W takich przypadkach zawsze powstaje pytanie, czy podobną zgodność uzyskałby Autor w odniesieniu do danych eksperymentalnych przeprowadzonych dla tych samych czynników przez innych autorów danych. Takich porównań nie przeprowadzono.

Rozdział siódmy oraz ósmy to podsumowanie wyników pracy oraz wnioski.

2. Teza pracy

Doktorant stawia trzy hipotezy badawcze, a mianowicie:

1. Jeżeli zmniejsza się gęstość strumienia ciepła w procesie skraplania w minikanale pionowym, to ulega ograniczeniu zakres stosowności dotychczasowych korelacji opisujących współczynnik przejmowania ciepła;
2. Jeżeli proces skraplania odbywa się w minikanale pionowym, to wraz ze zmniejszeniem średnicy minikanalu wzrasta udział oporów tarciovych w stosunku do hydrostatycznych;
3. W przypadku procesu skraplania czynnika chłodniczego w minikanale rurowym, zachodzącego przy znacząco różnych wartościach gęstości strumienia ciepła, istnieje konieczność uwzględnienia tej wielkości w opisie zjawiska.

W przypadku pierwszej hipotezy, jako że w większości przypadków spadek ciśnienia oraz wymiana ciepła podczas skraplania są opisywane za pomocą korelacji empirycznych to należy się spodziewać, że przy innych (mniejszych) wartościach strumienia ciepła istniejące korelacje będą przewidywały te wartości w sposób odbiegający od rzeczywistości. Z tego względu ważnym jest aby korelacje miały podstawy teoretyczne, które umożliwiałyby właściwe przewidywanie wymiany ciepła i oporów przepływu. Druga hipoteza jest raczej

niepodważalna i można się było spodziewać wyników ją potwierdzających. Co do trzeciej to Autor zaproponował korelacje, które uwzględniają wpływ strumienia ciepła.

Trzecia hipoteza jest oczywiście prawdziwa i została w pełni udokumentowana przeprowadzonymi przez Doktoranta badaniami i obliczeniami zamieszczonymi w pracy. W pracy przedstawiono bardziej porównanie oporów przepływu dla trzech czynników, niż skupiono uwagę na zjawiskach fizycznych mających miejsce w przepływie.

3. Oryginalność pracy

W mojej ocenie oryginalne osiągnięcia pracy to:

1. specjalnie w tym celu zaprojektowane i wykonane stanowisko pomiarowe do badania oporów przepływu podczas kondensacji w przepływie
2. opracowanie metodyki prowadzenia badań eksperymentalnych
3. przeprowadzenie systematycznych i precyzyjnych pomiarów oporów przepływu oraz wymiany ciepła dla trzech czynników chłodniczych tj. R404A, R407C oraz R410A w pojedynczych kanałach
4. Opracowanie wyników badań eksperymentalnych w postaci zależności korelacyjnej, w której widnieje widoczny wpływ strumienia ciepła. Przedstawienie odpowiednich spadków ciśnień w funkcji stopnia suchości przy zmiennej wartości gęstości strumienia masy przyczyna się do wyjaśnienia wpływu strumienia ciepła na opory przepływu podczas kondensacji.

4. Wartości użytkowe pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się bardzo dużym umocowaniem praktycznym, gdyż zagadnienia kondensacji w przepływie mają miejsce w szeregu zagadnień technicznych w skraplaczach, szczególnie w świetle faktu, że kanały przepływowe wprowadzane do praktyki inżynierskiej są coraz mniejsze. Projektowanie tego typu urządzeń bez wiedzy, która została przedstawiona przez Doktoranta prowadzi do przewymiarowania takich wymienników, a co za tym idzie niepotrzebnego zwiększania kosztów. Znajomość spadków ciśnienia w minikanalach i ich wielokrotnościach przyczynia się do lepszego wykorzystania materiału oraz poprawy ekonomii produktu.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przy lekturze pracy nasuwają się następujące słowa komentarza oraz uwagi krytyczne.

5.1. Uwagi merytoryczne

Tematyka pracy jest bardzo aktualna, ale żeby bardziej poprawić zrozumienie tej tematyki należałoby w sposób bardziej precyzyjny poprowadzić analizę uzyskanych wyników badań.

1. Pokazana jest procedura redukcji wyników celem uzyskania lokalnej wartości gęstości strumienia ciepła. Przy zapoznawaniu z poszczególnymi wzorami razi niekonsekwencja dotrzymywania odpowiednich przypisów dolnych przy wielkościach fizycznych takich jak $T_{w,i}$, $T_{p,i}$, $T_{s,i}$, $T_{wz,i}$ oraz $q_{w,i}$ (wzory 4.2-4.5). Przedstawione procedury dotyczą bardzo ważnych parametrów eksperymentu. We wzorze (4.2) wyznaczenie lokalnej wartości gęstości strumienia ciepła odbywa się za pomocą znajomości wartości temperatury ścianki oraz lokalnej temperatury powietrza. Problem w tym, że temperaturę ścianki mierzy się w dziewięciu punktach, podczas gdy temperaturę powietrza w trzech. W tekście nie

wyjaśniono gdzie dokładnie znajdują się lokalizacje pomiarowe temperatury powietrza oraz czego dotyczy indeks i , według którego wyznacza się przekrój pomiarowy. Czy jest to punkt związany ze ścianką, czy z pomiarem powietrza. Podejrzewam, że jest to punkt związany z lokalizacjami termopar na ściance. Autor powołuje się na procedurę Shina i Kima (2004), w której wyznacza się charakterystykę cieplną odcinka pomiarowego celem uzyskania funkcji $q=f(T_w-T_F)$. Wprowadza tu kolejny symbol dotyczący temperatury płynu, którego nigdzie nie wyjaśnia. Procedura ta powinna być lepiej opisana w pracy.

2. W pracy przedstawiono bardziej porównanie oporów przepływu dla trzech czynników, niż skupiono uwagę na zjawiskach fizycznych mających miejsce w przepływie. Jak dokładnie mierzono ciśnienie w kanale. Jaka była procedura wyznaczania elementu tarcowego spadku ciśnienia. Czy uwzględniane były straty związane z rozszerzaniem i zwężaniem kanału przepływowego w sekcji pomiarowej?
3. Czy w procedurze wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła uwzględniany był radialny spadek temperatury w ściance ze stali nierdzewnej?

5.2. Uwagi redakcyjne

Przy lekturze pracy zauważyłem także pewne usterki edytorskie, które zamieściłem poniżej.

1. We wzorach (2.21) i (2.25) współczynnik przewodzenia ciepła jest oznaczony jako k , a powinno być λ .
2. We wzorze (2.59) mnożnik dwufazowy powinien być oznaczony jako Φ_{TPi}^2 , a nie jako Φ_{TPi}^n . We wzorze (2.60) powinno się więc także podstawić symbol Φ_{TPi}^2 .
3. Str. 44⁹ – w definicji liczby Bonda Kandydat używa symbolu h_{lv} jako ciepła parowania, a w reszcie pracy używa symbolu r .
4. W spisie literatury Autor odwołuje się do dwóch różnych artykułów, które w istocie są tymi samymi. Mam na myśli prace (powinna być jedynie pierwsza z poniższych):
Mikielewicz D. [et al.] Pressure drop of HFE7000 and HFE7100 during flow condensation in minichannels [Article] // International Journal of Refrigeration, Volume 68. - 2011. - pp. 226-241.
Mikielewicz J. [et al.] Pressure drop of HFE7000 and HFE7100 during flow condensation in minichannels [Article] // International Journal of REfrigeration. - 2016. - pp. 226-241.

6. Wniosek końcowy

Biorąc powyższe uwagi pod rozwagę stwierdzam, że w moim przekonaniu praca może stanowić rozprawę doktorską. Wyżej wymienione uchybienia nie umniejszają znacząco wartości merytorycznej pracy. Traktuję ją jako rzeczywisty wkład do teorii przepływów dwufazowych. Dotyczy ona systematycznych badań oporów przepływu podczas kondensacji w przepływie w mini kanałach z uwzględnieniem efektu małej wartości odbieranego przez czynnik chłodzący strumienia ciepła. Interpretacja wyników stanowi pewną część dyskusyjną, którą skomentowałem powyżej, niemniej szanuję w tej kwestii warsztat badawczy Autora i moje komentarze proszę przyjąć raczej za wskazówki do poprawy jakości publikacji, które powstaną w przyszłości. Z pewnością przyczynią się do lepszej oceny wyników pracy. Uzyskane wyniki obserwacji oraz przeprowadzona analiza wyników jest interesująca, ważna zarówno z punktu widzenia poznawczego jak też i praktyki inżynierskiej. Autor uzyskał wyniki na drodze rozważań literaturowych, analizy przeprowadzonych przez siebie badań eksperymentalnych i obliczeń za pomocą własnego modelu. Wykazał się umiejętnością analizy wyników badań eksperymentalnych, umiejętnością posługiwania się procedurami obliczeniowymi ze standardowych programów wspomagających obliczenia oraz głęboką

wiedzą dotyczącą zagadnienia. Doktorant wykazał się inwencją twórczą w prowadzeniu prac, jak też dużą samodzielnością w rozwiązaniu postawionego zagadnienia. Uzyskane wyniki budzą zaufanie. Przedstawione uwagi krytyczne nie pomniejszają istotnie osiągnięć pracy.

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez odpowiednie ustawy. Biorąc powyższe pod uwagę, **stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Marcina Kruzla do publicznej obrony.**

