

Poznań , dnia 30.05.2018

Dr hab. inż. Krzysztof Bińczak, prof. PP  
ul. H. Kołłątaja 138  
61-421 Poznań

W P Ł Y N Ę Ł O

PK/UM 10217/123/2013  
dnia 15.06.2013

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Kruzela  
pt. „ Modelowanie skraplania czynnika chłodniczego  
w pionowym minikanale rurowym”

Recenzja została przygotowana na podstawie pisma dr hab. inż. Błażeja Bałasza, prof. Politechniki Koszalińskiej dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej ( Umowa o dzieło DK 27 z dnia 2018.04.17)

## 1. Dane ogólne

Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal, a promotorem pomocniczym dr inż. Małgorzata Sikora. Praca liczy ogółem 219 stron i składa się z wprowadzenia siedmiu rozdziałów merytorycznych, spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, wykazu rysunków i tablic, bibliografii i czterech załączników. Bibliografia obejmuje 185 pozycji ułożonych w kolejności alfabetycznej. Doktorant jest współautorem 6 pozycji.

## 2. Analiza rozprawy

W pracy mgr inż. Marcin Kruzel podjął bardzo istotny problemem dotyczący miniaturyzacji urządzeń chłodniczych i ograniczenia napełnienia instalacji czynnikiem chłodniczym. Problematyka realizowana w pracy jest bardzo aktualna gdyż użytkownicy urządzeń chłodniczych zwracają szczególną uwagę, aby nowo instalowane urządzenia były:

- przyznane dla środowiska,
- koszty ich eksploatacji były relatywnie niskie.

Minimalizacja ilości czynnika znajdującego się we wnętrzu urządzenia chłodniczego jest bardzo ważna, gdyż obserwuje się obecnie gwałtowny wzrost cen syntetycznych czynników chłodniczych, również w przypadku rozszczelnienia instalacji do środowiska przedostanie się mniej czynnika.

We wprowadzeniu Doktorant stwierdza, iż projektanci kompaktowych wymienników ciepła mają duże problemy z doбором odpowiednich procedur obliczeniowych.

W rozdziale 2 stanowiącym przegląd aktualnego stanu wiedzy Autor omawia między innymi mechanizm procesu skraplania. Dzieli proces ten na:

- skraplanie kropelkowe,
- skraplanie błonowe.

W większości urządzeń technicznych realizowane jest skraplanie błonowe. Charakteryzuje także struktury przepływu dwufazowego podczas skraplania w pojedynczym kanale pionowym.

W dalszej części rozprawy (rozdział 2.2) omówione są czynniki chłodnicze. W rozdziale 2.3 Doktorant dokonał klasyfikacji kanałów stosowanych w budowie wymienników ciepła, a następnie wykonał przegląd zależności opisujących procesy wymiany ciepła przy skraplaniu poczynając od wydanej w 1916 r. pracy Nasselta.

W wyniku wykonanego przeglądu literatury Autor stwierdza:

- modele obliczeniowe dotyczą w większości skraplania w kanałach konwencjonalnych i nie mogą być stosowane do opisu skraplania w mini i mikrokanalach,
- mało jest badań opisujących skraplanie w kanałach pionowych,
- niewiele jest korelacji dotyczące skraplania przy niskich wartościach strumienia ciepła  $q$ ,
- większość modeli powstała w oparciu o badania tylko dla jednego czynnika,
- w istniejących modelach nie zwracano uwagi na wpływ właściwości czynnika chłodniczego na wymianę ciepła.

Następnie Doktorant dokonał analizy zależności opisujących opory przepływu w kanałach stwierdzając:

- modele obliczeniowe spadku ciśnienia w większości odnoszą się do kanałów konwencjonalnych i nie mogą być stosowane do kanałów o małej średnicy,
- niewiele prac odnosi się do obliczenia spadku ciśnienia w kanałach pionowych,
- modele obliczeniowe w minikanalach odnoszą się głównie do dużych wartości strumienia ciepła,
- większość modeli powstała w oparciu o badania jednego czynnika.

Wykonany krytyczny przegląd literatury pozwolił Doktorantowi na określenie obszaru własnych badań tzn. skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w pionowych minikanalach chłodzonych powietrzem. Jako cel pracy przyjęto stwierdzenie wpływu średnicy wewnętrznej minikanalu oraz sposobu chłodzenia i wybranych właściwości czynnika chłodniczego na wartość współczynnika przejmowania ciepła i oporu przepływu podczas procesu skraplania przy niskich wartościach gęstości strumienia ciepła na chłodzonych powierzchniach.

Osiągnięcie celu rozprawy wymagało rozwiązania następujących zadań badawczych:

- rozpoznanie stanu wiedzy na temat skraplania w mikro- i minikanalach,

- analizy procesu skraplania w pionowych minikanalach podczas przepływu czynnika chłodniczego,
- porównania skraplania w kanałach chłodzonych wodą i powietrzem,
- określenia lokalnych i średnich współczynników przejmowania ciepła oraz spadku ciśnienia w obszarze skraplania,
- zbudowanie autorskiego modelu wymiany ciepła i spadku ciśnienia podczas skraplania w pionowych minikanalach chłodzonych powietrzem.

Autor sformułował trzy hipotezy badawcze:

1. Zmniejszenie gęstości strumienia ciepła w procesie skraplania powoduje ograniczenie zakresu stosowalności dotychczasowych korelacji opisujących współczynniki przejmowania ciepła.
2. W minikanalach pionowych wraz ze zmniejszeniem średnicy wzrasta udział oporów tarcowych w stosunku do oporów hydrostatycznych.
3. W opisie skraplania należy uwzględnić wartości gęstości strumienia ciepła.

Udowodnienie przyjętych hipotez badawczych wymagało przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Badania zrealizowano dla czynników chłodniczych R404A, R407C i R410A w zakresie:

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| - średnica kanału           | $d_w = 0,5 \div 2,5 \text{ mm}$  |
| - gęstość strumienia masy   | $G = 100 \div 1100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| - gęstość strumienia ciepła | $q = 500 \div 5000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$                      |
| - stopień suchości          | $x = 1 \div 0$   |

Doktorant zbudował stanowisko badawcze wyposażone w niezbędną aparaturę pomiarową. Przy budowie stanowiska z pewnością zostały wykorzystane wieloletnie doświadczenie Badaczy związanych z Politechniką Koszalińską. Dla wybranych czynników wykonał 864 serie pomiarowe badań. Badania te pozwoliły na sporządzenie charakterystyk cieplno-przepływowych wyrażających wpływ gęstości strumienia masy  $G$ , stopnia suchości  $x$ , średnicy minikanalu oraz rodzaju czynnika na:

- średni spadek ciśnienia,
- lokalny spadek ciśnienia,
- średni współczynnik przejmowania ciepła,
- lokalny współczynnik przejmowania ciepła.

Wyniki własnych badań w zakresie charakterystyk hydrodynamicznych Doktorant porównał z wynikami innych autorów, podobnie uczynił w przypadku charakterystyk cieplnych. Wykonane badania pozwoliły także na identyfikację struktur przepływu podczas skraplania czynnika chłodniczego w pionowym minikanale rurowym.

W rozdziale 6 Autor przedstawił własne korelacje opisujące:

- spadek ciśnienia w przepływie,
- wymianę ciepła.

We wspomnianym rozdziale również został przeanalizowany wpływ gęstości strumienia ciepła na intensywność wymiany ciepła podczas skraplania w minikanalach.

Dwa ostatnie rozdziały pracy poświęcone są podsumowaniu wyników badań doświadczalnych oraz sformułowaniu wniosków. Doktorant stwierdza, iż sformułowane w rozdziale 3 pracy hipotezy zostały potwierdzone.

### 3. Uwagi merytoryczne

Po zapoznaniu się z pracą nasuwają się następujące uwagi merytoryczne:

1. Przy sformułowaniu celu rozprawy (s. 65) cele główne rozprawy lepiej nazwać zadaniami badawczymi.
2. W zakończeniu pracy brakuje jasno sformułowanych kierunków dalszych badań.
3. W pracy Autor zamiennie używa pojęcia para i gaz (np. s. 16), co może być mylące w przypadku chłodniczych układów transkrytycznych.
4. We wzorze (2.5) udział masowy nie powinien być wyrażony w procentach.
5. Zamiast pojęcia lubrykant proponowałbym pojęcie olej smarny.
6. Brak oznaczenia numerów segmentów kanału pomiarowego nie pozwala stwierdzić czy wzór (4.9) ma poprawną postać.

### 4. Ocena pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kruzela pt. „Modelowanie skraplania czynnika chłodniczego w pionowym minikanale rurowym” jest pracą oryginalną wpisującą się w realizowane na Politechnice Koszalińskiej od wielu lat badania procesu wrzenia i skraplania czynników chłodniczych. Opracowane korelacje mogą być bardzo przydatne w procesie projektowania skraplaczy wyposażonych w minikanaly chłodzone powietrzem.

Do głównych osiągnięć Doktoranta można zaliczyć:

1. Wykonanie krytycznego przeglądu literatury i wskazanie potrzeby uzupełnienia wiedzy w zakresie procesów skraplania czynników chłodniczych w pionowych minikanalach rurowych. Zebrane informacje mogą być pomocne także przy projektowaniu skraplaczy dla potrzeb praktyki gospodarczej.
2. Twórcze wykorzystanie wiedzy zgromadzonej w Politechnice Koszalińskiej (około pięćdziesięcioletniej) przy budowie własnego stanowiska badawczego. Dzięki temu mogło powstać bardzo dojrzałe stanowisko.
3. Przygotowanie metodyki badawczej, która może być wykorzystana dla innych czynników.

4. Opracowanie własnych korelacji opisujących proces wymiany ciepła i spadku ciśnienia w pionowych minikanałach rurowych. Porównanie tychże korelacji z wynikami innych autorów bardzo uwiarygodniło uzyskane rezultaty.
5. Poznanie mechanizmu skraplania (struktur przepływu) w pionowych minikanałach.

Wyrażona w punkcie 3 recenzji uwaga o braku sformułowania kierunków dalszych badań, wynika z ciekawości piszącego recenzję, kiedy w pracach projektowych będzie można posługiwać się „koszalińskimi” korelacjami opisującymi proces skraplania w kanałach wielorurowych chłodzonych powietrzem.

Myślę, iż moja ciekawość zostanie zaspokojona przez Doktoranta w czasie prezentacji pracy.

Strona edycyjna pracy nie budzi zastrzeżeń. Oczywiście w pracy znalazły się drobne potknięcia edycyjne, które nie mają żadnego wpływu na wartość merytoryczną.

Reasumując stwierdzam, iż recenzowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko, a zawarte w recenzji uwagi mają charakter dyskusyjny.

## **5. Wniosek końcowy**

Na podstawie dokonanej analizy i oceny pracy pana mgr inż. Marcina Kruzela pt.: „Modelowanie skraplania czynnika chłodniczego w pionowym minikanale rurowym” stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

*K. Bieniara*