

W P Ł Y N Ę Ł O

dnia 30.04.2020
PK/UM/BW/7/607/2020

Prof. dr hab. inż. Mieczysław E. Poniewski Płock, 14.04.2020 r.
Instytut Inżynierii Mechanicznej
Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii
Politechnika Warszawska, Filia w Płocku

Recenzja pracy doktorskiej
mgr inż. Aleksandra Denisa
„Badanie niestabilności dynamicznych skraplania proekologicznych czynników
chłodniczych w minikanalach rurowych”

1. Dane ogólne

Przedstawiona mi do oceny rozprawa została wykonana pod naukowym kierownictwem dr hab. inż. Waldemara Kuczyńskiego, w Katedrze Energetyki Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W części zasadniczej składa się ona z wykazu oznaczeń, ośmiu rozdziałów oraz spisu literatury, o łącznej objętości 129 stron. Ponadto zawiera pięć załączników i dwa streszczenia, liczące razem 74 strony. Cytowane jest 148 pozycji literatury.

Zgodnie z tytułem dotyczy ona zagadnień dynamiki przepływu dwufazowego podczas skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych. Zagadnienia dynamiki przepływów dwufazowych mają szerokie zastosowanie w różnorodnych gałęziach przemysłu, jak chłodnictwo, energetyka, przemysł chemiczny i inne. Obecnie najczęściej spotykaną geometrią, w której realizuje się przepływy dwufazowe, jest minikanal rurowy lub prostokątny.

Recenzowana rozprawa ma zarówno aspekt poznawczy, jak i wyrazisty aspekt praktyczny.

2. Omówienie treści pracy

Rozdz. 1 poświęcono krótkiemu omówieniu głównych kierunków badań i modernizacji, wspólnych dla energetyki i chłodnictwa, jak miniaturyzacja urządzeń i korespondująca z nią minimalizacja ilości czynnika w obiegu, a przede wszystkim redukcja negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne.

Obszerny i historyczny przegląd właściwości czynników chłodniczych, włącznie z najnowszymi, dopiero przewidzianymi do wdrożenia, stanowi treść rozbudowanego **rozdz.2**. Należy tu zaznaczyć, że proekologiczne cechy badanych czynników nie stanowią treści rozprawy, a jedynie wskazanie do wyboru właściwych czynników do badania niestabilności skraplania w przepływie dwufazowym.

Rozdz. 3 poświęcono wyjaśnieniu szczególnych właściwości przemiany fazowej skraplania i towarzyszących jej niestabilności w przepływie dwufazowym, zwłaszcza w minikanale rurowym. W podsumowaniu rozdziału podkreślono, że oddziaływania falowe niestabilności dynamicznych są zjawiskami niepożądanymi, często skutkującymi uderzeniami hydraulicznymi. Natomiast zaburzenia wynikające z blokady kapilarnej prowadzą do znaczącego zmniejszenia wydajności cieplnej i są słabo rozpoznane.

Kolejny rozdział, **rozdz.4**, opisuje, w zwarty sposób, drogę dojścia Doktoranta do ustalenia kolejno tematu rozprawy, hipotezy, celu i zakresu badań. W uporządkowany sposób

przedstawiono obszary badań eksperymentalnych i porównawczych dla dotychczas stosowanych i nowych, proekologicznych czynników chłodniczych. Zdefiniowano również rodzaje, zakresy i cele poszczególnych eksperymentów oraz wskazano na oczekiwane wyniki pomiarów i sposoby ich wykorzystania.

Recenzowana rozprawa ma w przeważającej mierze charakter eksperymentalny i dlatego stanowisku badawczemu oraz zastosowanym metodom pomiarowym dla przepływu dwufazowego para – ciecz podczas skraplania poświęcono oddzielny rozdział rozprawy, tj. **rozd.5**. Zestawiono kolejno wszystkie wielkości mierzone a następnie wielkości określane pośrednio, ważne dla opisu niestacjonarnego procesu skraplania w przepływie przez minikanal. Opisano procedury generacji periodycznej zmiany gęstości strumienia masy czynnika za pomocą sterowanego zaworu elektromagnetycznego oraz redukcji niepewności pomiarowej dla przesunięcia czasowego rejestrowanych sygnałów.

W następnym rozdziale, **rozd.6**, zebrano i poddano analizie wyniki badań dynamiki skraplania w minikanalach rurowych, dotyczące kolejno:

- wpływu zakłóceń na zmiany natężenia przepływu, ciśnienia i temperatury w pojedynczych minikanalach;
- wyznaczania prędkości propagacji periodycznych niestabilności dla nowych czynników chłodniczych;
- wyznaczania prędkości przemieszczania się niestabilności ciśnieniowych i temperaturowych;
- zmian długości strefy skraplania w funkcji częstotliwości zakłóceń.

Wyniki poszczególnych pomiarów zebrano w tablicach i pokazano na towarzyszących im wykresach. Całość badań eksperymentalnych podsumowano licznymi wnioskami, a do najważniejszych zaliczam:

- falowy charakter rozprzestrzeniania się niestabilności dynamicznych, z charakterystycznymi i różnymi prędkościami dla zmian ciśnienia i zmian temperatury;
- prędkość sygnału zmiany ciśnienia jest o dwa rzędy wielkości większa od prędkości sygnału zmiany temperatury i obie te wielkości są ze sobą powiązane;
- propagacja niestabilności ciśnieniowych i temperaturowych zależy od stopnia zapełnienia oraz strumienia ciepła.

W finalnym wniosku tego rozdziału Autor podkreśla poprawność postawionej wcześniej tezy, że częstotliwość generowania niestabilności dynamicznych podczas skraplania badanych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych powoduje zmiany ich przemieszczania się oraz wpływa na wielkość strefy skraplania właściwego.

Rozdz.7 poświęcony jest modelowaniu fizycznemu, opartemu na analizie wymiarowej, prowadzącemu do uzyskania modeli regresyjnych niestabilności ciśnieniowych i temperaturowych dla badanych czynników chłodniczych. Rozdział kończy zbiorcza tablica zawierająca zestawienie korelacji do obliczania bezwymiarowych prędkości przemieszczania się niestabilności ciśnieniowych i temperaturowych, wraz z oszacowaniem błędów pomiarowych.

W **rozd.8** przedstawiono podsumowanie całości wyników badań eksperymentalnych i modelowania niestabilności dyspersyjnych w postaci fali akustycznej (fali ciśnienia) i propagacji frontu skraplania (fali temperatury) dla skraplania w przepływie przez minikanal. Zebrano i rozbudowano wnioski, prezentowane wcześniej, uzupełniając je o wskazania do

praktycznego wykorzystania rezultatów badawczych rozprawy. Wykazano, że ograniczanie dopływu czynnika chłodniczego skutkuje wzrostem długości jednofazowej strefy dochłodzenia skroplin z jednoczesnym zmniejszeniem się strefy skraplania właściwego, co powoduje spadek wydajności cieplnej skraplacza. Podkreślono, w rozbudowanej formie, poprawność sformułowanej wcześniej tezy i wskazano praktyczne walory uzyskanych rezultatów badań.

3. Uwagi krytyczne i ocena rozprawy

3.1. Uwagi redakcyjne

Oceniana rozprawa ma jasny, logiczny układ, gdyż została starannie zredagowana. Charakteryzuje się dbałością o szatę graficzną oraz dobrze wykonanymi i opisanymi rysunkami. Do zalet należy zaliczyć starannie sporządzone spisy oznaczeń i cytowanej literatury.

Za więcej niż błąd redakcyjny uważam nadmierne rozbudowanie rozdz.2 i załącznika 1. Jak zaznaczyłem wcześniej, zagadnienia właściwości ekologicznych czynników chłodniczych nie stanowią przedmiotu ocenianej rozprawy, a całość danych dla chłodniczych czynników syntetycznych nowej generacji pochodzi z jednego raportu firmy Bitzer, komercyjnie publikującej dane fizykochemiczne czynników chłodniczych

Za niezręczne uważam zamieszczanie w rozprawie obszernych tablic z eksperymentalnymi danymi liczbowymi. Te dane mają fundamentalną wartość dla Autora rozprawy, ale dla innych czytelników, w tym recenzentów, stanowią trudny do jakiegokolwiek weryfikacji zbiór wielu liczb. W tym miejscu właściwym byłoby skierowanie uwagi każdego czytelnika do załączonego dysku.

Autor co najmniej trzykrotnie podkreśla w rozprawie, że wykazał zasadność postawionej tezy. Moim zdaniem wystarczyłoby „raz a dobrze”, co uczynił w rozdz.8.

Mimo, podkreślonej wcześniej, staranności nie uchroniono się od prostych omyłek językowych, jak w zdaniu: «... oraz „cofanie się” frontu skraplania v_T w kierunku przeciwnym do przepływu czynnika...». We wstępie do Załącznika 2 na str.145 błędnie podano nr tegoż załącznika. Omyłek i niezręczności językowych, jak wskazane, nie wykryje zakładka *recenzent* WORD-a, trzeba to uczynić w kolejnym czytaniu rozprawy.

Wskazane uchybienia nie deprecjonują pracy, ale przeszkadzają w odbiorze jej merytorycznych osiągnięć.

3.2. Uwagi merytoryczne

Ważny dla tematyki rozprawy rozdz.3, dotyczący niestabilności przemiany fazowej skraplania, opracowano na podstawie obszernej i starannie dobranej literatury przedmiotu. Wnioski wynikające z tego przeglądu pozwoliły poprawnie ustalić temat, cel i zakres oraz tezę rozprawy, co zaznaczyłem wcześniej.

Do badań dynamiki skraplania przystosowano i zmodernizowano istniejące stanowisko pomiarowe, wyposażając je w karty pomiarowe o wysokiej częstotliwości próbkowania i nowoczesne oprogramowanie DasyLabPro. Wprowadzone zmiany umożliwiły wdrożenie zaplanowanej metodyki i zakresu badań doświadczalnych. Metodykę badań, przejrzyste wyjaśnioną w rozprawie, uzupełniono o ocenę dokładności zastosowanych czujników i błędów pomiarowych, Dodatek 4.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam cały zbiór wyników badań eksperymentalnych, zawarty w rozdz.6 oraz wnioski z tychże badań, zapisane w obu rozdziałach, rozdz.6 i rozdz.8, co wskazałem we wcześniejszej ocenie. W rozprawie właściwie dobrano materiał ilustracyjny, przedstawiający schematy układów pomiarowych i przede wszystkim wyniki badań eksperymentalnych. Przytoczone przykłady dyskusji uzyskanych wyników pomiarów wskazują na dogłębne zrozumienie fizyki obserwowanych zjawisk.

Konsekwentne zastosowanie tradycyjnej metody analizy wymiarowej dało znaczący wynik, objaśniający fizykę niestabilnego procesu skraplania w minikanalach, ujęty syntetycznie w tablicy 7.1.

Mam pewne zastrzeżenia do sposobu zadawania periodycznych zakłóceń masowego natężenia przepływu czynnika chłodniczego. Zastosowano najprostszy rodzaj zaworu, czyli zawór odcinający. Powoduje to, że sygnał zakłócający jest trudny do dokładnego zaprogramowania i opisania. Zastosowanie zaworu liniowego, który liniowo wiąże wznos grzybka ze zmianą natężenia przepływu umożliwiłoby potraktowanie minikanalu jako wymiennika ciepła i zmierzenie a następnie porównanie eksperymentalnych i obliczeniowych wartości tłumienia i przesunięcia fazowego dla ciśnienia i temperatury dla sinusoidalnych pulsacji natężenia przepływu o zmiennej wartości sygnału i zmiennej częstotliwości.

Proszę traktować przedstawioną krytykę jako sugestię następnych badań z wykorzystaniem istniejącego stanowiska pomiarowego.

3.3. Ocena rozprawy

Sumując uwagi krytyczne i słowa uznania jednoznacznie pozytywnie oceniam rozprawę doktorską mgr inż. Aleksandra Denisa. Uważam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony.

