

W P Ł Y N Ę Ł O

dnia 22.04.2020

PK/UM/BU/7/606/2020 **Ocena rozprawy doktorskiej**

**mgr. inż. Aleksandra Denisa**

**pt.: „Badanie niestabilności dynamicznych skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych”**

*Promotor pracy:*

*dr hab. inż. Waldemar Kuczyński, prof. PK*

### **1. Zawartość pracy**

Przedłożona do opinii praca ma 206 stron i została podzielona na 7 rozdziałów, podsumowanie, spis literatury, 5 załączników (72 strony). Zawiera również streszczenia w języku polskim i angielskim, a całość umieszczono na załączonej płycie CD.

We **wstępie** (rozd. 1) Doktorant podał zasadnicze powody podjęcie tematyki rozprawy zwracając uwagę na dążenie do miniaturyzacji wymienników ciepła ze względu na oszczędność materiału oraz energii niezbędnej do ich wytworzenia i eksploatacji. Słusznie przy tym podkreślił, że zmniejszanie wymiarów wymienników ciepła wiąże się z koniecznością opracowania stosownych wytycznych dla projektantów. Wobec braku pełnego rozeznania zjawisk występujących podczas przejmowania ciepła w warunkach skraplania w przepływie w minikanalach, tj. kanałach o umownej średnicy hydraulicznej poniżej 3 mm, tematykę rozprawy uważam za aktualną naukowo i ważną z praktycznego punktu widzenia.

W **rozd. 2** Doktorant skupił się na wymaganiach stawianych czynnikom chłodniczym ze względu na ich negatywne oddziaływanie na środowisko. Omówił akty prawne, które regulują stosowanie czynników chłodniczych oraz scharakteryzował wycofywane i nowowprowadzane czynniki chłodnicze, ze szczególnym uwzględnieniem czynników wykorzystanych w badaniach własnych.

**Rozdz. 3** jest poświęcony wpływowi niestabilności na proces skraplania w przepływie. Podane wiadomości bardzo dobrze świadczą o znajomości literatury i przygotowaniu merytorycznym Doktoranta.

W **rozd. 4** przedstawiono tezę rozprawy, a także cel i zakres pracy.

**Rozdz. 5** zawiera opis stanowiska badawczego i procedury pomiarowej. Szczególną uwagę zwrócono na kluczowy parametr dla ilościowego opisu badanych zjawisk, którym jest przesunięcie czasowe reakcji poszczególnych czujników na zmianę stanu zaworu wywołującego zakłócenie. W celu uniknięcia subiektywnego oznaczania przesunięcia czasowego zastosowano procedury dopasowania krzywych opisujących przebieg punktów eksperymentalnych.

**Rozdz. 6** jest poświęcony prezentacji i analizie wyników badań eksperymentalnych procesu skraplania wybranych czynników chłodniczych, tj. R1234ZE, R1234yf, R507 oraz R448A, w poziomych rurkach o średnicach 1.40 mm, 1.44 mm, 1.92 mm, 2.30 mm i 3.30 mm i długości 880 mm. Częstotliwość generowanych zakłóceń periodycznych mieściła się w zakresie od 0.2 do 5 Hz. Mając na uwadze zmianę stopnia suchości w pełnym zakresie, tj. od 0 do 1, można uznać, że przedstawione wyniki badań stanowią dobrą podstawę do wniosków o charakterze bardziej ogólnym.

W szczególności Doktorant ustalił, że podobnie jak w przypadku wycofywanych z użytkowania czynników chłodniczych, takich jak R134a oraz R404A, propagacja niestabilności dynamicznych ma charakter falowy, a wartości prędkości frontu skraplania i prędkości rozprzestrzeniania się niestabilności ciśnienia są zbliżone. Podobnie jak dla R134a i R404A również dla badanych czynników, długość strefy skraplania maleje wraz ze spadkiem częstotliwości generowania zakłóceń (rys. 6.13). Sposób opracowania i przedstawienia wyników pomiarów świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia badań doświadczalnych. Istotne jest, że Doktorant w każdym przypadku podjął próbę interpretacji fizycznej osiągniętych wyników, a także przedstawił dogłębną analizę niepewności pomiaru.

W **rozd. 7** Doktorant przedstawił własne równania obliczeniowe prędkości przemieszczania się impulsu ciśnienia i prędkości frontu skraplania. Równania są oparte na analizie wymiarowej. Całą procedurę przedstawiono w zał. 4. Współczynniki w proponowanych równaniach wyznaczono przy użyciu metody regresji nieliniowej wykorzystując program Statistica. Uzyskana zgodność wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi w zakresie  $\pm 25\%$  świadczy o poprawnym doborze parametrów

wpływających na analizowane prędkości. Doktorant podjął również próbę uogólnienia swojego modelu na grupy czynników chłodniczych. I w tym przypadku zgodność wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi mieści się w zakresie  $\pm 25\%$ . Mając na uwadze złożoność badanego procesu należy wysoko ocenić umiejętności Doktoranta w zakresie stosowania złożonych metod analityczno-numerycznych służących do opracowywania wyników pomiarów.

**Rozdz. 8** to wnioski końcowe i podkreślenie najważniejszych, z punktu widzenia Doktoranta, wyników badań.

## 2. Teza pracy

Doktorant podał tezę swojej pracy w sposób jawny. Stwierdza w niej, że: *„częstotliwość generowania niestabilności dynamicznych podczas skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych powoduje zmiany prędkości ich przemieszczania oraz wpływa na wielkość strefy skraplania właściwego”*.

W podsumowaniu rozdz. 6 Doktorant jednoznacznie ustosunkował się do przyjętej tezy, stwierdzając, że w pełni została potwierdzona jej prawdziwość.

## 3. Oryginalność pracy

Oryginalne osiągnięcia pracy to:

- propozycje równań do obliczania bezwymiarowej prędkości impulsu ciśnienia i frontu skraplania nowych proekologicznych czynników chłodniczych (tab. 7.1),
- propozycje równań do obliczania bezwymiarowej prędkości frontu skraplania w funkcji bezwymiarowej prędkości impulsu ciśnienia dla wybranych grup czynników chłodniczych – równania (7.15) i (7.16).

## 4. Wartości użytkowe pracy

Wszystkie wyniki zamieszczone w pracy mogą mieć potencjalnie znaczenie aplikacyjne. W szczególności dotyczy to ustalenia długości strefy skraplania w zależności od parametrów wymuszenia dynamicznego.

## 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. str. 13 – podstawowym kryterium w ocenie kompaktowości wymienników ciepła jest stosunek ich powierzchni wymiany ciepła do objętości ( $A/V$ ), a nie średnica użytych rurek,
2. str. 54 – badania przeprowadzono przy malejącej częstotliwości zakłóceń – od  $f_{\max} = 5$  Hz do  $f_{\min} = 0.2$  Hz. Co zdecydowało o takiej procedurze pomiarowej? Czy w trakcie badań obserwowano histerezę wpływu częstotliwości wymuszeń na prędkość rozprzestrzeniania się niestabilności temperaturowych  $v_T$  i ciśnieniowych  $v_p$ ?
3. str. 54 - dlaczego zdecydowano się na przeprowadzenie pomiarów przy warunku  $t_z = t_0$ ? Jak zmiana proporcji  $t_z/t_0$  wpłynie na stabilność procesu skraplania?
4. str. 91 – z rys. 6.11 wcale jednoznacznie nie wynika, „że istnieje *proporcjonalna* zależność między prędkością rozprzestrzeniania się niestabilności temperaturowych  $v_T$  i ciśnieniowych  $v_p$ ”,
5. str. 98 – dlaczego jako parametr wpływający na prędkość przemieszczania się impulsu ciśnienia  $v_p$  wybrano stopień zapelnienia  $\phi$ , a nie stopień suchości  $x$ ? To samo pytanie odnosi się do prędkości frontu skraplania  $v_T$  – równanie 7.9. Przecież stopień zapelnienia jest parametrem obliczanym na podstawie wyznaczanego doświadczalnie stopnia suchości. Czym się kierowano wybierając do obliczeń stopnia zapelnienia równania 6.1 do 6.4?,
6. str. 101 – równanie (7.8) – zamiast  $b \cdot \log \Delta p^+ \cdot c \cdot \log \phi$  powinno być  $b \cdot \log \Delta p^+ + c \cdot \log \phi$ ,
7. str. 102 – równanie (7.11) – zamiast  $b \cdot \log \Delta T^+ \cdot c \cdot \log \phi$  powinno być  $b \cdot \log \Delta T^+ + c \cdot \log \phi$ ,
8. str. 108 – trudno się zgodzić ze stwierdzeniem, że „zależności (7.10) i (7.14) są *równoznaczne*”. Czy chodzi o to, że są równoważne?

## 6. Uwagi redakcyjne, terminologia, jednostki

Terminologia stosowana w rozprawie jest poprawna, chociaż Doktorant nie ustrzegł się niewłaściwych terminów, niezręcznych sformułowań czy niepoprawnych jednostek.

Przykładowo:

- str. 7 – jednostka  $[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$  wskazuje, że „G” jest *gęstością strumienia masy czynnika chłodniczego*, a nie strumieniem masy czynnika chłodniczego,
- str. 7 – mając na uwadze wzór (7.2) nasuwa się pytanie czym się różni  $\dot{m}_r$  od  $\dot{m}_{ust}$ ?,
- str. 8 – dla  $\Delta T_w$  nie podano jednostki,

- str. 8 – zamiast *gęstość lokalnego strumienia ciepła* powinno być lokalna gęstość strumienia ciepła,
- str. 42 – akapit zaczynający się od słów „Niestabilności wpływające na...” jest częściowo powtórzeniem tekstu ze str. 13,
- str. 43 – może zamiast sformułowania *pierwsze skropliny czy pojedyncze skropliny* bardziej właściwie byłoby pierwsze (pojedyncze) krople (strużki) skroplin?,
- str. 58 – we wzorach (5.2), (5.3) oraz (5.4), ale także na str. 100 zamiast  $\tau$  powinno być  $t$ ,
- str. 93 – zamiast *jednostkowego strumienia ciepła* powinno być gęstości strumienia ciepła,
- str. 108 i dalej – zaproponowane modele (funkcje) mają charakter potęgowy (wykładniczy), a nie „regresyjny”,
- str. 127 – powinno być Kakać S., a nie Kakač S.

Praca jest napisana na wysokim poziomie edytorskim, z dobrze dobranym materiałem ilustracyjnym. Zachowana jest właściwa numeracja wzorów oraz kolejność przywoływania cytowanej literatury.

Drobniejsze uchybienia redakcyjne i stylistyczne zaznaczyłem w dostarczonym egzemplarzu pracy i przekazałem Doktorantowi w bezpośredniej rozmowie.

Przedstawione powyżej uwagi mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i redakcyjny i w niczym nie umniejszają wartości merytorycznej pracy, którą oceniam wysoko.

## 7. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona praca zawiera oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autora naukowych metod doświadczalnych, a także analityczno-numerycznych stosowanych w inżynierii mechanicznej – według poprzedniej klasyfikacji w budowie i eksploatacji maszyn, a tym samym wyczerpuje warunki określone przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dn. 14.03.2003 roku i uzasadnia dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*J. Ciwikowski*