

dr hab. inż. Jacek Stelmach  
Politechnika Łódzka  
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

## **RECENZJA**

**pracy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Szymona Frankiewicza**  
**pt. Mieszanie nieustalone gaz-ciecz w mieszalniku z mieszadłem o wygiętych łopatkach**  
**promotor pracy: dr hab. inż. Szymon Woziwodzki**

Niniejsza recenzja została przygotowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej prof. dr hab. inż. Ewy Kaczmarek z dnia 17 października 2023 r.

### **Wybór tematu badawczego**

Mieszanie mechaniczne jest ważnym procesem przemysłowym stosowanym m.in. w procesach wymiany ciepła i masy. Mimo wieloletnich doświadczeń nadal są badane i wprowadzane nowe konstrukcje mieszadeł mające na celu polepszenie efektywności tego procesu przez co zwykle rozumie się osiągnięcie wymaganego celu mieszania (np. ogrzania zawartości mieszalnika, dostarczania do mieszanej cieczy jak największej ilości tlenu) przy jak najmniejszych nakładach energetycznych. Istnieje też drugi sposób polegający na polepszeniu działania już istniejących konstrukcji. Ten drugi sposób został wybrany przez Doktoranta. W badaniach zrealizowanych przez Doktoranta skupiono się na mieszanii nieustalonej, tak aby zwiększyć ogólnie rozumianą intensywność mieszania. Jak dotychczas mieszanie nieustalone nie znalazło zastosowania w warunkach przemysłowych. Można wykluczyć, że jedną z przyczyn takiego stanu jest brak wiedzy projektantów o jego możliwościach. Recenzowana praca może to w pewnym stopniu zmienić, gdyż Doktorant przebadał mieszadła stosowane w mieszalnikach przemysłowych podczas pracy w warunkach nieustalonych, tzn. przy zmienianej podczas pracy częstości obrotowej lub/i podczas mieszania nawrotnego. Przy obecnym stanie techniki przedstawienie układu mieszającego na pracę w warunkach nieustalonych nie stanowi dużego problemu. Dlatego temat pracy należy uznać za właściwy, tak z poznawczego, jak i praktycznego punktu widzenia.

Określony w części eksperymentalnej cel pracy jest jasno opisany i zasadniczo nie budzi zastrzeżeń. Jedynie cel określony jako zaprojektowanie mieszadeł RT-6, CD-6,... jest

niewłaściwie sformułowany. Te mieszadła zostały zaprojektowane już dawno temu i to nie przez Doktoranta. Co więcej mieszadło Rushtona nazwane mieszadłem wirnikowym otwartym było przedmiotem normy branżowej z 1975 roku (BN-75/2225-06).

### **Ocena formalna pracy**

Przedstawiona do recenzji praca składa się z dwóch podstawowych części. Pierwsza z nich to analiza literaturowa dotychczasowej wiedzy o mieszaniu w warunkach ustalonych i nieustalonych. W tej części Doktorant skupił się na zagadnieniach mocy mieszania i wymiany masy. Oba te zagadnienia są bardzo ważne z punktu widzenia efektywności mieszania i ich wybór nie budzi zastrzeżeń. Jak należało się spodziewać, większość odwołań literaturowych (127) znalazła się w tej części. W tym miejscu można zwrócić uwagę na fakt, że przedstawione teorie wnikania masy powstały wiele lat temu i w tej tematyce nie powstało nic nowego. Część doświadczalna zawiera opis przeprowadzonych badań oraz opracowanie otrzymanych wyników. Opis wykonanych eksperymentów jest zrozumiały dla czytelnika, jakkolwiek nie zawsze jest pełny. Np. brak jest informacji o częstotliwości pomiarów chwilowych wartości momentu obrotowego.

### *Uwagi ogólne*

Praca liczy 205 stron i zawiera 172 rysunki oraz 31 tabel. Świadczy to o obszerności pracy i chęci rzetelnego przedstawienia wyników przez Doktoranta. W pracy zacytowano 140 pozycji literaturowych. Praca napisana jest starannie, a szata graficzna ogólnie nie budzi zastrzeżeń. Rysunki są wstawione we właściwych miejscach tekstu, jednak czytelność sporej ich części wykresów budzi zastrzeżenia, przy czym częściowo wynika to z oprogramowania użytego do ich stworzenia. Poprzez dobór kształtu i wypełnienia znaczników oraz dodanie siatki uzyskano by większą czytelność.

### **Ocena merytoryczna pracy**

Recenzowana praca doktorska jest klasyczną pracą doświadczalną. Jak wcześniej wspomniano, Autor skupił się na dwóch zagadnieniach, tj. mocy mieszania i wnikaniu masy, gdyż zatrzymanie fazy gazowej też można uznać za zagadnienie ściśle związane z transportem masy. Nie wyczerpują one całości zagadnień opisujących pracę badanych mieszadeł. Do tego brakuje m.in. określenia czasów mieszania (homogenizacji), rozkładów wielkości pęcherzyków gazu w cieczy oraz pól prędkości i pulsacji prędkości. Jednak jedynie pierwsze z wymienionych zagadnień jest łatwe do zrealizowania. Natomiast pozostałe to potencjalne tematy kolejnych

doktoratów. Szczególnie ciekawy może być opis zagadnień hydrodynamicznych podczas mieszania nieustalonego i porównanie go z mieszaniem w warunkach ustalonych.

Doktorant badał pięć typów mieszadeł, z których cztery generują przepływ obwodowo-promieniowy, a jedynie jedno przepływ osiowy. Nie wyjaśniono dlaczego dokonano takiego wyboru mieszadeł i zrezygnowano z mieszadła turbinowego o pochylonych łopatkach (ang. pitched blade turbine), którego praca w warunkach ustalonych jest dobrze opisana w literaturze.

Badania zostały przeprowadzone w dość szerokim zakresie liczb Reynoldsa  $Re$  ( $30000 < Re < 140000$ ) i Keulegana-Carpentera  $KC$  ( $5 < KC < 128$ ). Zakres zmienności liczby Reynoldsa odpowiada rozwiniętemu mieszaniu burzliwemu i z tego względu dobór bediów badawczych należy uznać za zadawalający. Szkoda, że Autor w części wstępnej rozprawy nie wyjaśnił czy mieszanie ze zmianą kierunku obrotów ma sens dla układów o dużej lepkości.

Część pomiarów dotycząca mieszania w warunkach ustalonych została zapewne wykonana – choć nie jest to wprost powiedziane – w celu sprawdzenia metod badawczych i aparatury pomiarowej. Porównanie uzyskanych rezultatów z danymi literaturowymi wykonano w sposób opisowy, ale zadawalający.

Przy porównywaniu wyników dla mieszania ustalonego i nieustalonego Doktorant podaje możliwe albo najbardziej prawdopodobne (?) wytłumaczenie obserwowanych różnic. Przy obecnym stanie wiedzy takie postępowanie nie budzi zastrzeżeń.

Można odnieść wrażenie, że informacje i pomiary dotyczące współczynnika oporu  $C_D$  i bezwładności  $C_I$  są w pracy „na dokładkę”. Próżno bowiem w pracy szukać ich praktycznego zastosowania. Być może znalazły by zastosowanie przy ewentualnej analizie zmęczeniowej badanych mieszadeł. Nie mniej jednak wykazują one biegłość Doktoranta w wykonywaniu pomiarów i opracowywaniu uzyskanych danych. W pewnym stopniu jest to odmienne potraktowanie tematu opracowania wyników pomiarów momentu obrotowego na wale mieszadła.

Wyniki badań Doktorant uogólniał równaniami potęgowymi. Ponieważ błędy wynikające z aproksymacji są małe, a prosta forma zależności korelacyjnych ułatwia ich stosowanie, takie podejście należy uznać za właściwe.

W pracy brak jest jednoznacznego stwierdzenia, że badane mieszadła w warunkach mieszania nieustalonego zapewniają lepszą efektywność transportu masy niż w warunkach ustalonych. Można się jedynie domyślać, że w pewnych warunkach tak jest. Z kolei stwierdzenie o wyższości mieszania nieustalonego pod względem ograniczenia dezintegracji komórek bez znajomości rozkładów naprężeń w cieczy nie musi być prawdziwe. Podobnie jak

w przypadku rozbijania pęcherzyków gazu, za część „zniszczeń” odpowiada mechaniczne działanie łopatek na komórki.

#### Uwagi krytyczne

Ogólnie ocena strony formalna i merytoryczna pracy jest dobra. Jednak Autor nie ustrzegł się nieścisłości, z których część można uznać za skróty myślowe. Ich lista jest następująca:

str. 12

W literaturze<sup>1</sup> dla mieszadeł generujących przepływ osiowy opisano jeszcze jeden sposób mieszania nieustalonego przez zmianę kąta natarcia łopatek podczas obracania się mieszadła. Proszę to potraktować jako uzupełnienie, bowiem nie ma możliwości zapoznania się ze wszystkim, co napisano o mieszaniu ustalonym i nieustalonym.

str. 14

Szkoda, że nie napisano wprost, że współczynniki  $C_D$  i  $C_I$  odnoszą się do całego mieszadła, a nie do łopatki. Chyba, że jest inaczej, ale przeczą temu wartości współczynników oporu.

str. 20 tabela 3

Dla mieszadła PBT nie podano liczby łopatek i ich kąta nachylenia. Podana wartość liczby mocy mieszania sugeruje cztery łopatki i kąt  $45^\circ$ . Dla sześciu łopatek i kąta  $45^\circ$  liczba mocy wynosi około 1,6.

str. 21

Za łopatką poruszającą się w płynie zawsze powstaje przestrzeń obniżonego ciśnienia. Zjawisko to wykorzystywane jest np. w mieszadłach samozasysających do dyspergowania gazu.

str. 21-27

Autor nie mówi tego wprost, ale sugeruje, że zmniejszenie mocy mieszania w układzie ciec-z-gaz jest korzystne energetycznie. Jednak ze względu na możliwość pracy bez

---

<sup>1</sup> Задорский В.М., Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода, Киев, Техника 1989.

dyspergowania gazu silnik i tak trzeba dobrać według zapotrzebowania mocy dla układu jednofazowego.

str. 37 i inne

Wyrażenie  $P/(V \cdot \rho)$  określa nic innego, jak szybkość dyssypacji energii. Szkoda, że Autor tego nie napisał, gdyż jest to powszechnie stosowane określenie.

str. 43

Literatura sugeruje, że wiry o średnicy 0,6 rozmiaru pęcherzyków najlepiej je rozbijają.

str. 44

Pęcherze gazowe są również rozbijane przez mechaniczne działanie nań łopatek mieszadła, o czym Autor nie wspomina. Niestety trudno jest oszacować jaka część pęcherzy jest rozbijana przez wiry, a jaka przez łopatki.

str. 45

Równanie (57) jest równaniem wymiarowym i powinno być ...+0,0009 m.

str. 55

Opór wnikania masy po stronie gazowej można pominąć jedynie w przypadku gazów trudno rozpuszczalnych w cieczy (m.in. tlen w wodzie). Przy średniej rozpuszczalności gazów (np. ditlenek węgla w wodzie) nie można zrobić takiego uproszczenia i trzeba brać pod uwagę współczynniki wnikania masy dla obu faz.

str. 72

Szkoda, że Autor nie podjął próby wyjaśnienia dlaczego mieszanie nieustalone nie znalazło szerszego zastosowania w praktyce przemysłowej.

str. 81-86 (pk. 7.4 Analiza parametryczna)

Brakuje informacji o miejscach przyłożenia siły lub momentu obrotowego.

Należy zwrócić uwagę, że przeprowadzona analiza naprężeń i odkształceń ma sens dla mieszania ustalonego. Dla mieszania nieustalonego przy następujących po sobie zmianach częstości i/lub kierunku obrotów mieszadła bardziej sensowna jest analiza zmęczeniowa. Autor w ogóle o niej nie wspomina. Proszę o krótki komentarz.

str. 93- (pk. 8 Moc mieszania układów jednorodnych)

Analizując uzyskane wartości liczby mocy mieszania można stwierdzić, że turbina Rushtona pracowała w zbiorniku z przegrodami. Niestety nie wspomniano o tym w teście. Interesujące są wyniki dla mieszadeł z wklęsłymi łopatkami, dla których liczby mocy są mniejsze niż dla turbiny Rushtona. Może jest to związane z hydrodynamiką?

str. 98-107 (pk. 8.1 Współczynniki oporu  $C_D$  i bezwładności  $C_I$ )

Czy Autor może określić związek między współczynnikiem oporu całego mieszadła i pojedynczej łopatki?

str. 101

Napisano, że „ dla  $KC > 15$  wartość  $C_D$  jest stała, a poniżej  $KC < 15$  maleje...”. Na rys. 64 jest odwrotnie. Chyba pomyłono znaki „<” i „>”.

str. 107

Na rys. 69 i 70 widoczne jest napowietrzanie przez lej. Jeżeli miało to miejsce w pomiarach zatrzymania fazy gazowej oraz objętościowego współczynnika wnikania masy to pomiary te będą obarczone błędem. Proszę o wyjaśnienia, bo być może nie wszystko zostało opisane w pracy. Jak się to ma do wniosku nr 3.

str. 107-109 (pk. 8.2 Siła nośna)

Można przypuszczać, że zgodnie z równaniem (102) wpływ siły nośnej na mieszany układ będzie zauważalny dla mieszadeł o przepływie osiowym. Autor badał tego typu mieszadło (Maxflo W), ale nie przedstawił wyników dla tego mieszadła. Dlaczego?

str. 120

Bez określenia wpływu różnicy prędkości obwodowej łopatek i cieczy na moc mieszania stwierdzenie, że „... największy wpływ na moc mieszania ustalonego ma współczynnik oporu” nie musi być poprawne.

Wymienione uwagi nie wpływają na ocenę pracy. Natomiast chciałbym, aby Autor szerzej omówił następujące zagadnienia.

### 1. Czas zmieszania

Ważnym parametrem w procesie mieszania jest czas zmieszania (homogenizacji). Uzupełnienie stanowiska badawczego o układ pomiaru przewodnictwa elektrycznego cieczy nie powinno stanowić dużego problemu. Dlaczego więc nie zdecydowano się przeprowadzić takich pomiarów?

### 2. Powiększanie skali

Autor przeprowadził badania w skali laboratoryjnej. Jeżeli przedstawiony sposób mieszania nieustalonego miałyby być zastosowany w większej skali należy określić zasady/kryteria podobieństwa. Można się domyślać, że takimi liczbami kryterialnymi będą liczba Reynoldsa  $Re$  i Keulegana-Carpentera  $KC$ . Proszę o szersze wyjaśnienie tej kwestii.

### 3. Efektywność

Autor określił zależności zapotrzebowania mocy i objętościowego współczynnika wnikania masy w zależności od różnych parametrów procesowych. W pracy brakuje jednak określenia efektywności mieszania, pozwalającej na łatwe porównanie przebadanych mieszadeł – jest jedynie omówienie słowne. Dlaczego nie podjęto takiej próby?

## **Wniosek końcowy**

Pomimo przedstawionych uwag krytycznych recenzowaną pracę doktorską mgr inż. Sebastiana Szymona Frankiewicza należy ocenić pozytywnie. Doktorant przebadał dużą liczbę konfiguracji układów mieszających pod względem mocy mieszania i wnikania masy podczas mieszania w warunkach nieustalonych. Z różnych względów ten sposób mieszania mechanicznego nie znalazł dotychczas szerszego zastosowania i wiadomości na jego temat w literaturze jest znacznie mniej niż dla klasycznego mieszania. Praca mgr inż. Sebastiana Szymona Frankiewicza w dość dużym stopniu wypełnia wspomniana lukę. Opracowane przez Doktoranta równania korelacyjne opisujące zapotrzebowanie mocy i wnikanie masy można uznać za elementy nowości w opisie procesu mieszania w układzie dwufazowym ciecz-gaz. Należy mieć nadzieję, że wyniki pracy spowodują większe wykorzystanie mieszania nieustalonego w warunkach przemysłowych.

Przedstawione do recenzji opracowanie stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora. Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Szymona Frankiewicza spełnia wymagania formalne wymagane dla tego typu opracowań i odpowiada wymogom ustawy o tytule i stopniach naukowych z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i

wnioskuje o przyjęcie pracy i dopuszczenie mgr inż. Sebastiana Szymona Frankiewicza do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Łódź, 28.11.2023.

