



RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Agaty Małysiak pt.: „Wybrane zagadnienia przenoszenia skali w krystalizatorach z wewnętrzną cyrkulacją zawiesiny”

Promotor: prof. dr hab. inż. Piotr M. Synowiec

1. Przedmiot i zakres pracy

Recenzowana praca dotyczy zagadnień powiększania skali krystalizatorów, w których cyrkulacja roztworu jest wymuszana przez mieszadło, z wykorzystaniem do tego metod numerycznej dynamiki płynów CFD.

Została ona zredagowana w czternastu rozdziałach, o różnym znaczeniu dla wartości rozprawy. Otwiera ją wprowadzenie, po którym w następnych dwóch rozdziałach Doktorantka omawia, w oparciu o literaturę, zagadnienia związane ze zmianą skali aparatów z mieszadłami, prezentując na tym tle aktualny stan wiedzy w odniesieniu do rozpatrywanych krystalizatorów. Przedstawia ogólne zasady i pragmatykę postępowania. Pokazuje jak zmieniają się wielkości charakteryzujące przebieg procesu, zależnie od przyjętych kryteriów zmiany skali. Szczególną uwagę poświęca procesowi krystalizacji, możliwym podejściom do powiększania jego skali i ich rezultatom. Rozważania te podsumowuje w następnym rozdziale.

Piąty rozdział pracy poświęca zastosowaniu numerycznej mechaniki płynów w modelowaniu transportu pędu, masy i energii. Podaje tutaj równania różniczkowe opisujące w sformalizowany sposób zasady zachowania tych wielkości, sposoby ich dyskretyzacji oraz rodzaje stosowanych siatek. Pokrótce omawia najczęściej stosowane modele burzliwości, przedstawiając także możliwe sposoby modelowania przepływów wielofazowych.

W oparciu o wnioski wynikające z rozeznania literaturowego, w kolejnym rozdziale formułuje cel i zakres pracy.

W dalszej części rozprawy rozpatruje kwestie przenoszenia skali w procesach krystalizacji pod kątem wyboru właściwych parametrów hydrodynamicznych i kinetycznych tego procesu. Za miarodajną przyjmuje intensywność cyrkulacji roztworu w aparacie, wyrażaną poprzez pierwotny czas jej trwania. Korzystając z najczęściej używanych kryteriów przenoszenia skali, analizuje jak ten czas zmienia wraz z rozmiarami krystalizatora i jak to wpływa to na kinetykę samego procesu.

W ósmym rozdziale rozpatruje konstrukcje krystalizatorów z wewnętrzną cyrkulacją zawiesiny wymuszaną przez mieszadła, pod kątem ich budowy, geometrii i proporcji wymiarów. Wyniki tych rozważań wykorzystuje przy wyborze aparatów stanowiących przedmiot badań w dalszej części pracy. Najpierw opisuje badania laboratoryjne dotyczące czasu trwania pierwotnej cyrkulacji zawiesiny, wykonane dla potrzeb weryfikacji wyników symulacji numerycznych oraz

danych literaturowych. Prezentuje tutaj stanowisko badawcze, metodykę badań, uzyskane w nich rezultaty i ich analizę. W kolejnych rozdziałach, stanowiących moim zdaniem najważniejszą część rozprawy, zajmuje się modelowaniem numerycznym krystalizacji w aparatach o różnej skali, w rozdziale jedenastym – z zachowanym pełnym ich podobieństwem geometrycznym, a w dwunastym – niecałkowitym. Symulacje wykonała dla różnych mediów, przy wykorzystaniu różnych kryteriów przenoszenia skali. W rezultacie Doktorantka otrzymała dane dotyczące wybranych, najistotniejszych parametrów mieszania, w krystalizatorach o różnej objętości. Przedstawiła i szczegółowo omówiła również rozkłady stężeń zawiesiny oraz granicznych, najmniejszych i największych kryształów w tych aparatach. Ponieważ wyniki uzyskane w podobnych geometrycznie krystalizatorach nie były satysfakcjonujące, dalsze symulacje wykonała dla takich ich rozwiązań, w których niezależnie od objętości, szczelina między mieszałem a rurą cyrkulacyjną miała taką samą szerokość.

Pracę zamykają rozważania końcowe i podsumowanie, po których podano bibliografię obejmującą 121 pozycji literatury, głównie specjalistycznej.

Całość liczy 169 stron tekstu, w tym 39 rysunków w postaci: zdjęć, schematów i wykresów oraz 20 tabel zestawieniowych.

2. Ocena pracy

Poznanie i badanie procesów jest tradycyjnie realizowane w drodze ich modelowania fizycznego, w małej, zwykle laboratoryjnej skali. Uzyskane w ten sposób wyniki trzeba potem przenieść na obiekty rzeczywiste. Ogólne zasady tego postępowania podaje teoria podobieństwa. Wynika z niej jednoznacznie, iż wymaga to zachowania pełnej zgodności, obejmującej wszystkie rodzaje i kryteria podobieństwa. Niestety, w praktyce jest to możliwe bardzo rzadko, tylko w odniesieniu do najprostszych procesów. Przy bardziej złożonych można zachować jedynie podobieństwo przybliżone, sprowadzające się do utrzymania równości wybranych kryteriów, najważniejszych dla danego procesu. Dla zmniejszenia ryzyka popełnienia błędu, wynikającego z wpływu wielkości aparatu na przebieg procesu, pożądane jest wykonanie analogicznych badań w większej skali, ale to wydłuża znacząco czas i podnosi koszty.

Korzystanie z drugiego, alternatywnego sposobu postępowania, jakim jest modelowanie matematyczne, ograniczają trudności związane z rozwiązywaniem modeli, mających na ogół postać złożonych układów równań różniczkowych. Nie można ich rozwiązać w sposób ścisły, a co najwyżej tylko w przybliżony, metodami numerycznymi. W ostatnich latach, dzięki szybkiemu rozwojowi technik analizy numerycznej i mocy obliczeniowych komputerów, staje się to możliwe i coraz częściej stosowane. Pomocna jest tutaj numeryczna dynamika płynów, w skrócie z angielskiego CFD, której metody wykorzystywane są w programach komercyjnych. Prowadzone tak modelowanie nazywa się umownie numerycznym. W porównaniu do fizycznego ma ono między innymi tę zaletę, że jego wyniki nie zależą od skali modelowanych procesów i urządzeń. Ta niezależność w rzeczywistości ma jednak tylko charakter formalny, bowiem wyniki symulacji wymagają weryfikacji doświadczalnej, wykonywanej na ogół w mniejszej skali, laboratoryjnej. Tym samym także tutaj kwestia przenoszenia skali odrywa istotną rolę i powinna być zawsze brana pod uwagę.

W tym kontekście uważam, że tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Agaty Małysiak została wybrana trafnie, jest interesująca z poznawczego punktu widzenia i ważna przy przemysłowych aplikacjach wyników badań. Dotyczy ona przenoszenia skali krystalizatorów, w których wewnętrzna cyrkulacja zawiesiny jest wymuszana przez mieszało. Zagadnienie to jest bez wątpienia trudne i złożone, a znane podejścia i stosowane kryteria są dalece niedoskonałe.

Doktorantka w swojej pracy podjęła próbę poprawy tego stanu, wykorzystując do tego modelowanie numeryczne przepływu w krystalizatorze. Poprzedziła je analizą stosowanych metod przenoszenia skali w odniesieniu do aparatów z mieszadłami, prowadząc dalej teoretyczne rozważania nad wyborem odpowiedniego parametru, charakteryzującego zarówno hydrodynamikę, jak i kinetykę krystalizacji, jaki powinien być uwzględniany przy przenoszeniu wyników badań laboratoryjnych na obiekty przemysłowe. Za taki parametr uznała czas trwania cyrkulacji pierwotnej w aparacie, będący miarą jej intensywności. Przyjmując dalej stosowane powszechnie w praktyce kryteria przenoszenia skali, takie jak: zachowanie stałej prędkości obwodowej mieszadła bądź jednostkowej mocy mieszania, sprawdziła, w jakim stopniu wielkość krystalizatora wpływa na ten czas, a w konsekwencji i na kinetykę procesu.

Już na tym etapie pracy stwierdziła, że przy tych kryteriach i zachowaniu pełnego podobieństwa geometrycznego, nie jest możliwe uzyskanie takiego samego czasu cyrkulacji w aparatach o różnej pojemności, a w ślad za tym i takiego samego przebiegu krystalizacji.

Dla takich warunków przeprowadziła również obliczenia numeryczne obejmujące podobne krystalizatory o różnej objętości, przy przepływie przez nie roztworu siarczanu amonu pozbawionego kryształów oraz w postaci zawiesiny monodispersyjnej i polidispersyjnej. W rezultacie otrzymała dane dotyczące najważniejszych parametrów mieszania, łącznie z wybranym jako dodatkowe kryterium oceny – czasem cyrkulacji, a także obrazy rozkładów stężeń kryształów zawiesiny w aparatach. Posłużyły one do dalszych porównań, a w odniesieniu do czasu cyrkulacji również weryfikacji doświadczalnej. Zgodnie z przewidywaniem wyniki otrzymane w podobnych geometrycznie krystalizatorach były niezadowolające z punktu widzenia kinetyki procesu. Dla zwiększenia intensywności cyrkulacji, w kolejnym etapie Doktorantka zrezygnowała z utrzymywania pełnego podobieństwa geometrycznego, przyjmując we wszystkich aparatach stałą szerokość szczeliny między mieszadłem a rurą cyrkulacyjną. Symulacje pokazały, że prowadzi to jedynie do nieznacznego skrócenia czasu cyrkulacji. Z przyjętych kryteriów powiększania skali „lepszym”, bo dającym mniejsze wydłużenie czasu cyrkulacji, okazało się być utrzymywanie stałej jednostkowej mocy mieszania. Idąc dalej Doktorantka przeprowadziła obliczenia zmieniając szerokość tej szczeliny, stwierdzając niewielkie zmiany czasu cyrkulacji i występowanie zakresów, w których osiąga on nieco niższe wartości, maksymalnie o około 10%.

Stosując przyjęte kryteria powiększania skali nie jest, więc możliwe utrzymanie równie intensywnej cyrkulacji w większych aparatach, warunkującej pożądany przebieg tworzenia się kryształów i ich wzrostu. Potwierdziło to znane już fakty i spostrzeżenia Doktorantki, wynikające z analizy stanu wiedzy w tej dziedzinie i jej rozważań poprzedzających badania.

Jeżeli czas cyrkulacji stanowi wskaźnik jakości przebiegu procesu, i skoro jest on odwrotnie proporcjonalny do częstości obrotów mieszadła, to jedynie utrzymanie takich samych częstości, może dawać równie intensywne przepływy w aparatach o różnej skali. Takie rozwiązanie prowadzi jednak do znaczącego wzrostu jednostkowej mocy mieszania (proporcjonalnie do kwadratu miary skali), a tym samym i niepożądanego, większego ścierania się kryształów, nie mówiąc już o lawinowo rosnących kosztach eksploatacyjnych.

W tej sytuacji Doktorantka proponuje nader ryzykowne rozwiązanie, sprowadzające się do całkowitej rezygnacji z zachowania podobieństwa geometrycznego oraz kryteriów zmiany skali na rzecz intuicyjnego podejścia do tego zagadnienia. Ilustruje to przykładem pokazującym, że wykonując badania w zupełnie innym aparacie pod względem kształtu i budowy, najlepiej najprostszym mieszalniku z przegrodami, pozbawionym rury cyrkulacyjnej, ale za to mającym przegrody, z użyciem innego, bardziej energochłonnego niż w rzeczywistości mieszadła,

zwiększając jeszcze dodatkowo moc mieszania, można uzyskać w rzeczywistym krystalizatorze praktycznie taki sam czas cyrkulacji.

Takie podejście burzy podstawy teorii podobieństwa, obowiązujące zasady postępowania stawia pod znakiem zapytania, nie jest do przyjęcia ze względów merytorycznych, a i jego przydatność aplikacyjna jest równie wątpliwa. Zdając się na taką dowolność nie ma żadnej pewności, że w innych przypadkach uzyska się podobny efekt. Uważam, że należałoby raczej poszukiwać rozwiązań zmieniając kryterium przenoszenia skali, na przykład zachowując stałą wartość liczby Froude'a.

Biorąc pod uwagę całość pracy oceniam ją pozytywnie. To, że nie udało się uzyskać spektakularnych wyników nie zależało od Doktorantki, ani od jej zaangażowania. Z racji trudnej i złożonej problematyki, prawdopodobieństwo sukcesu od początku było małe, i podejmując tę tematykę można było się z tym liczyć.

Nie wszystko w tej pracy zostało dostatecznie wyjaśnione i jasno przedstawione. Nie jest także ona wolna od drobnych błędów i pomyłek, wynikających głównie z niedostatecznie starannej korekty.

1. Wątpliwości budzi sposób, w jaki wyznaczano czas cyrkulacji w badaniach eksperymentalnych. Powinien to być czas między pojawieniem się kolejnych dwóch maksimów w przebiegu krzywej zmian przewodnictwa cieczy. Na przedstawionych wykresach można się dopatrzeć, co najwyżej dwóch takich maksimów, na niektórych tylko jednego (rys. 9.6). Co więcej dokładność, z jaką to robiono musiała być niewielka, skoro pomiary następowały co sekundę.
2. Z tabeli 9.2 wynika, że w badaniach eksperymentalnych prędkość obwodowa łopatek mieszadła wynosiła 4 m/s, natomiast symulacje numeryczne wykonano dla prędkości 5,1 m/s. W aparatach o objętości 11 dm³, w badaniach mieszadło miało inną, mniejszą średnicę (0,065 m) od przyjętej w symulacjach (0,084 m). Co uzasadniało taki wybór tych parametrów?
3. W pracy brakuje informacji, czym kierowano się w obliczeniach numerycznych wybierając taki a nie inny model turbulencji, jak modelowano warstwę przyścienną, jak postępowano z siatką zmieniając wielkość krystalizatora, czy powiększono odpowiednio jej elementy, czy też nie zmieniano ich wielkości, a tylko zwiększano liczebność elementów? Każda zmiana w tym zakresie może, bowiem wpływać na wyniki symulacji, a wykorzystany w pracy model turbulencji k-ε daje na ogół zaniżone wartości dyssypowanej energii.
4. Wykładnik przy ułamku masowym w równaniu Zwieteringa powinien mieć wartość 0,13. Wyliczone z tego równania minimalne częstości obrotów dotyczą zupełnie innego przypadku niż rozpatrywany w pracy, a mianowicie innego rozwiązania mieszadła (HE-3) tłoczącego ciecz w dół i pracującego w cylindrycznym zbiorniku z przegrodami i bez rury cyrkulacyjnej.
5. Doktorantka w rozdziale 11 poprzestała na wyznaczeniu prędkości opadania cząstek, a przecież w centralnej części krystalizatora ma miejsce pionowy przepływ zawiesiny. Powinno się więc określić prędkość zawieszania kryształów, uwzględniając przy tym oddziaływanie ścianek rury cyrkulacyjnej (wpływ średnicy), a następnie na tej podstawie prędkość konieczną do ich transportowania.
6. Niektóre wielkości i sformułowania w pracy są niewłaściwe. Przykładem może być: częstość obrotów mieszadła nazywana różnie – prędkością obrotów, prędkością obrotową mieszadła, częstotliwością mieszania, liczba wydajności przepływu cyrkulacyjnego nazywana liczbą cyrkulacji, szczelina między mieszadłem a rurą cyrkulacyjną nazywana nadłopatkową,

dno elipsoidalne określane jako eliptyczne,
czy mówienie o „w pełni zoptymalizowanym krystalizatorze”.

7. We wzorze (2.4) stosunek średnic mieszadeł powinien występować w potęgze $-2/3$, a nie $-3/2$. Przy przekształceniu wzorów (7.24) i (7.26) do postaci (7.27) w miejscu znaku równości pojawia się znak przybliżenia.

Według danych z tabel 11.1 i 11.2 mieszadła o takich samych średnicach, przy różnych częstościach obrotów mają taką samą prędkość obwodową.

Na str.143 Doktorantka opisuje punkt odpowiadający stosunkowi $d_r/d = 1,38$ leżący na rys.12.5, który obejmuje tylko zakres $1 \div 1,16$.

Szerokość szczeliny między mieszadłem a rurą cyrkulacyjną wynosi $(d_r-d)/2$, a nie jak podano d_r-d .

8. Wykresy są bardzo małe i słabo czytelne. W niektórych opisach osi brakuje jednostek, inne są nie do odczytania, choćby równania krzywych na rys. 12.6. Są też rysunki niepotrzebne, nic nie wnoszące, np. rys. (7.2) obrazujący przebiegi (7.10), (7.11).

Tę uwagę można częściowo rozszerzyć na prezentację wyników symulacji numerycznych, która wygląda może i bardziej efektownie, niż wyników eksperymentalnych, ale jest od nich jeszcze mniej czytelna. Mam na myśli rys. 11.1 ÷ 11.3 i 11.6 ÷ 11.8, prezentujące mapy konturowe rozkładów stężeń kryształów, których postać jest narzucona przez wykorzystywane oprogramowanie. Aparaty wielokrotnie różniące się gabarytami nie dość, że mają na tych rysunkach taką samą wielkość, to jeszcze różną się skalą kolorów, co bardzo utrudnia wszelkie porównania. Przykładowo w większych krystalizatorach warstewka kryształów na dnie jest ledwo widoczna i znacznie cieńsza niż w mniejszych aparatach, a rzeczywistości jest zupełnie inaczej. Zróżnicowanie wielkości aparatów na rysunkach ułatwiłoby ich analizę, a to można było próbować zrobić.

3. Wniosek końcowy

Oceniając pracę doktorską Pani mgr inż. Agaty Małysiak pt.: „Wybrane zagadnienia przenoszenia skali w krystalizatorach z wewnętrzną cyrkulacją zawiesiny” stwierdzam, że spełnia ona wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14 marca 2003 roku.

Doktorantka posiadała potrzebną wiedzę z zakresu mieszania i krystalizacji, numerycznej mechaniki płynów oraz umiejętność prowadzenia pracy naukowej. Jej praca doktorska poszerza spojrzenie na kwestie przenoszenia skali krystalizatorów z mieszadłami wymuszającymi wewnętrzną cyrkulację zawiesiny, przez uwzględnienie aspektów hydrodynamicznych oraz kinetycznych procesu i wykorzystanie do tego modelowania numerycznego.

Zagadnienia podniesione w uwagach nie mają większego wpływu na otrzymane wyniki, dotyczą w dużej mierze spraw formalnych i porządkowych, a więc z punktu widzenia oceny całości – drugorzędnych. Stawiam, zatem wniosek o przyjęcie tej pracy i dopuszczenie Pani mgr inż. Agaty Małysiak do jej publicznej obrony.

Kamień

