

prof. dr hab. inż. Romuald Mosdorf
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45C
15-351 Białystok

Białystok, 12.05.2019

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Sandry Storczyk nt: "Metoda obliczania aparatu do przeponowej wymiany ciepła z równoczesną rektyfikacją substancji".

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Mariusz Markowski, prof. PW, promotorem pomocniczym jest dr inż. Sławomir Alabrudziński.

Podstawa przygotowania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Janusza Zielińskiego z dnia 4.04.2019 roku.

Struktura pracy

Praca podzielona jest na 8 rozdziałów, zawiera wykaz oznaczeń, wykaz pojęć i skrótów oraz wykaz literatury zawierający 59 pozycji, w tym 3 prace, których współautorem jest Pani mgr inż. Sandra Storczyk - tylko jedna z nich opublikowana jest w czasopiśmie.

W rozdziale 1. "Geneza pracy" stwierdzono, że w przybliżeniu 3% światowego zużycia energii związane jest z procesami rozdziału energii w kolumnach destylacyjnych. Dlatego istnieje konieczność opracowania konstrukcji energooszczędnych urządzeń stosowanych w procesach rozdziału substancji. Na podstawie wcześniejszych prac wskazano, że kolumnę rektyfikacyjną można zastąpić wymiennikiem ciepła i masy o specjalnej konstrukcji. Przedstawiono wyniki analizy energetycznej dotychczasowej technologii oraz porównano je z wynikami uzyskanymi z zastosowaniem nowej technologii. W rozdziale 2. "Stan wiedzy" omówiono destylację frakcyjną. Przedstawiono różne rozwiązania konstrukcyjne urządzeń.

W rozdziale 3. przedstawiono hipotezę pracy dotyczącą sposobu modelowania nowego typu wymiennika służącego do przeponowej wymiany ciepła z równoczesną rektyfikacją substancji. Przedstawiono cel oraz zakres pracy polegający na opracowaniu modelu fizycznego i matematycznego aparatu, w którym występują równoczesne zjawiska przeponowej wymiany ciepła i rektyfikacji.

Opis matematyczny procesów zachodzących w układzie do termicznego rozdziału substancji przedstawiono w rozdziale 4. podzielonym na pięć podrozdziałów. Przedstawiono "Model idealnego układu o minimalnych stratach egzegetycznych" i "Model fizyczny układu do termicznego rozdziału substancji". Zagadnienia dotyczące wyznaczania profilu kolumny omówiono w podrozdziale "Profile kolumn". Następnie omówiono zagadnienia związane z wyznaczaniem powierzchni wymiany ciepła metodą oporów cieplnych oraz z wyznaczaniem rzeczywistych profili kolumn. Rozdział 5. dotyczy zagadnień optymalizacji aparatu w celu zmniejszenia zużycia energii. Omówiono termiczny rozdział substancji zachodzący poniżej i powyżej temperatury otoczenia. Algorytm doboru wymiennika ciepła i masy przedstawiono w rozdziale 6. W rozdziale 7. przedstawiono wyniki obliczeń, w których porównano zużycie energii w układzie tradycyjnym oraz skonstruowanym z zastosowaniem nowej technologii. Wyniki obliczeń podsumowano w rozdziale 8. Podsumowanie całej pracy przedstawiono w rozdziale 9. "Podsumowanie i wnioski".

Merytoryczna zawartość pracy

W rozdziale "Geneza pracy" uzasadniono potrzebę prac nad nowymi energooszczędnymi urządzeniami stosowanymi w procesach rozdziału substancji. Na rys.2 pokazano schemat idealnej kolumny rektyfikacyjnej z nieskończoną liczbą skraplaczy oraz reboilerów. Pokazano, że kolumnę rektyfikacyjną można zastąpić wymiennikiem ciepła i masy o specjalnej konstrukcji. Schemat takiego układu pokazano na rys.4. Wielokanałowy układ takiego wymiennika przedstawiono schematycznie na rys.5. Na rys.6 pokazano schemat układu do rozdziału termicznego substancji z wykorzystaniem kolumn stosowanych w przemyśle, natomiast na rys.7 - schemat układu wykorzystujący nową technologię. Wyniki analizy przedstawiono na podstawie pracy [29], której współautorem jest promotor pracy.

W rozdziale 2. omówiono destylację frakcyjną. Schemat kolumny zintegrowanej cieplnie przedstawiono na rys.8. Schematycznie pokazano wymianę ciepła pomiędzy częścią wzmacniającą kolumny a częścią odpędową - schemat układu z pokazano na rys.9. Omówiono różne rozwiązania konstrukcyjne pokazane na kolejnych rysunkach od 10 do 19.

Hipotezę badawczą pracy sformułowano następująco:

"Stosując model idealnej kolumny, opisany za pomocą profili kolumny, model oporów cieplnych w wymianie ciepła oraz model półki teoretycznej w wymianie masy można opracować matematyczny opis dla nowego typu wymiennika, zbudowanego z kanałów przepływowych o dowolnej geometrii kanału, służącego do przeponowej wymiany ciepła z równoczesną rektyfikacją substancji."

Przyjęto, że celem pracy jest "stworzenie modelu fizycznego oraz matematycznego opisu aparatu według nowej technologii, w którym występują równoczesne zjawiska przeponowej wymiany ciepła i rektyfikacji, o znacznie mniejszym zużyciu energii w porównaniu do stosowanej w przemyśle technologii."

Zakres pracy obejmował: "wykonanie analizy stanu wiedzy dotyczącej integracji cieplnej układu do rektyfikacji substancji, opracowanie modelu fizycznego układu do termicznego rozdziału substancji oraz jego analizy egzergetycznej, sformułowanie opisu matematycznego aparatu według nowej technologii oraz opracowanie wytycznych do uproszczonych obliczeń numerycznych".

W pracy rozpatrywano odwracalny proces wymiany ciepła i masy, (proces, w którym różnice: temperatur, ciśnień i stężeń dążą do zera). Na rys.20 pokazano schemat idealnego układu do termicznego rozdziału substancji. Przyjęto, że mieszanina składników znajduje się w stanie ciekłym w temperaturze otoczenia. Podgrzewa się do temperatury nasycenia T_s po dostarczeniu ciepła Q_s . Przyjęto, że w idealnej kolumnie w części odpędowej w każdym reboilerze dostarczane jest ciepło dQ_o , natomiast w każdym skraplaczu odbierane jest ciepło dQ_r . Destylat i ciecz wyczerpana schładzane są do temperatury otoczenia T_{ot} . Zapisano bilans strumieni egzergii. Przyjęto, że straty strumienia egzergii wynoszą zero. Wzory od 5 do 14 opisują składniki bilansu.

Autorka pracy zaproponowała model fizyczny (rozdział 4.2) kolumny o skończonych rozmiarach - model pokazano na rys.22. We wzorach od 15 do 19 przedstawiono bilans masy i energii na n-tej półce. Bilans masy składników przedstawiono we wzorach od 20 do 24. Bilans ciepła przedstawiono we wzorach od 25 do 29. Warunki brzegowe opisano zależnościami 30 i 31. Przedstawiono również opis układu o nieskończonej liczbie reboilerów i skraplaczy, uogólniając równania otrzymane w rozdziale 4.2. Schemat bilansowania kolumny pokazano na rys.25. Bilans energii zapisano w równaniach 32 i 33. Bilans masy - w równaniach 34 i 35, natomiast bilans masy i-tego składnika - w równaniach od 36 do 39. Warunki brzegowe przedstawiono w równaniach od 40 do 42. Przykładowe profile kolumn pokazano na rys.26 - na podstawie pracy [30] (której współautorem jest Doktorantka).

Przedstawiono zasadę wyznaczania powierzchni wymiany ciepła w układzie do rektyfikacji z zastosowaniem technologii kanałowej. W tym przypadku zastąpiono

integrowane części kolumn wymiennikiem płytowym. Powierzchnię wymiany ciepła wyznaczono z zależności od 43 do 45, w których wykorzystano teorię oporów cieplnych.

Rzeczywisty profil kolumny wyznaczono korzystając z zależności określającej ogólną sprawność kolumny. Liczba półek teoretycznych wymaga znajomości liczby półek rzeczywistych. Zaproponowano, iż można ją wyznaczyć w oparciu o rozwiązanie równań bilansu masy i pędu. Schemat bilansowania j-tej półki teoretycznej przedstawiono na rys.25. Równania bilansu energii, masy i masy i-tego składnika zapisano w równaniach od 47 do 50.

W rozdziale "Optymalizacja aparatu pod kątem zmniejszenia zużycia energii" analizowano przypadek, w którym rozdział substancji następuje w temperaturze niższej od temperatury otoczenia. Rozpatrywano przypadek, w którym zużycie energii mechanicznej do napędu sprężarki jest minimalne. Równanie 51 opisuje funkcję celu w przypadku, gdy temperatura czynnika roboczego jest niższa od temperatury otoczenia, natomiast równanie 52 opisuje funkcję celu w przypadku, gdy temperatura czynnika roboczego jest wyższa od temperatury otoczenia. Składniki równań 51 i 52 opisano w równaniach od 53 do 55. Analizowano przypadek, w którym zmienną decyzyjną jest ciśnienie w części wzmacniającej i odpędowej. Na rys.30 pokazano schemat układu, w którym wymiennik jest zlokalizowany w układzie sprzężonym z elektrociepłownią.

Schemat algorytmu doboru wymiennika ciepła i masy pokazano na rys.31. Przykładowe obliczenia wykonano dla układu pokazanego na rys.32. Analizowany układ składał się z dwóch kolumn, każda z kolumn składała się z części odpędowej i wzmacniającej. Przyjęto, że w pierwszej kolumnie część odpędowa wykonana jest według nowej technologii, a wzmacniająca według technologii tradycyjnej, natomiast w drugiej kolumnie przyjęto odwrotnie. W analizowanym układzie przewidziano sprzężenie pomiędzy częścią odpędową w pierwszej kolumnie a częścią wzmacniającą w drugiej kolumnie. Wyniki obliczeń wykonanych dla układu pokazanego na rys.32 porównano z wynikami uzyskanymi dla układu pokazanego na rys.33 (wykonanym według tradycyjnej technologii). Na rys.34 pokazano wyznaczone profile kolumn, zaś na rys.35 pokazano schemat układu z naniesionymi parametrami eksploatacyjnymi. Schemat propylenowego obiegu chłodniczego pokazano na rys.36. Na kolejnych rysunkach 37, 38 i 39 pokazano zmiany temperatury w układzie. Schemat tradycyjnego układu z naniesionymi parametrami eksploatacyjnymi pokazano na rys.40. Wykorzystane w obliczeniach współczynniki podano w równaniach 59 i 60. Geometrię układu pokazano na rys.45. Struktury przepływu w kanale, obliczone z wykorzystaniem programu Fluent, pokazano na rys.46. Przyjęto stopień sprawności teoretycznej (0.6) i wyznaczono liczbę półek rzeczywistych i teoretycznych.

Uzyskane wyniki obliczeń pokazały, iż nowy układ jest mniej energochłonny w porównaniu z układem tradycyjnym. Zmniejszenie zużycia energii mechanicznej wynosiło 9%. Pokazano, że w szczególnym przypadku, gdy lotność obu substancji jest podobna, można uprościć algorytm obliczeniowy. Uproszczony algorytm obliczeniowy przedstawiono na rys. 50.

Uwagi krytyczne

W pracy skupiono się przede wszystkim na opracowaniu metody obliczania aparatu bazując na cząstkowych modelach (model oporów cieplnych, model półki teoretycznej). Jednak taki model trudno uznać za uniwersalny bez przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

Wyjaśnienia wymagają następujące zagadnienia:

- W rozdziale 4.3 podano zależności pozwalające na wyznaczenie charakterystyki kolumny. Taką charakterystykę przedstawiono na rys. 26, gdzie pokazano funkcję $T(H)$ - jednak w równaniach zamieszczonych w pracy brak jest zależności

wyznaczającej wielkość H . Nie podano, przy jakich parametrach uzyskano rozwiązanie oraz w jaki sposób rozwiązywano układ równań.

- W rozdziale 7.4 przedstawiono wyniki obliczeń przepływów w programie Fluent. Nie podano: równań różniczkowych opisujących przepływ, modelu oddziaływania faz i pozostałych parametrów, przy których uzyskano rozwiązania. Nie pokazano miejsc, które uznano za półki rzeczywiste. Nie podano również, jak intensywne powinno być mieszanie, aby obszar taki można było uznać za półkę rzeczywistą. Nie uzasadniono, dlaczego przyjęto stopień sprawności teoretycznej równy 0.6. Na rys.46 nie pokazano skali (kolorów). Nie podano procedury wyznaczania wielkości Q_{RZ} oraz Q_T

Wybrane uwagi redakcyjne

- W rozdziale 4.1 nie jest cytowana żadna praca, co sugeruje, że wcześniej nikt nie opracował takiego modelu. Brak cytowań pod rysunkami 1, 2, 3, 4 również jest mankamentem pracy.
- W opisie wielkości brak Q_{RZ} oraz Q_T .
- W wykazie literatury zamieszczono pracę [31], nie podając, do jakiego czasopisma została wysłana.

Podsumowanie

Przedstawiona do oceny praca doktorska jest pracą teoretyczną. Uzyskane wyniki analiz wskazały kierunki dalszych prac, które mogą doprowadzić do opracowania skutecznych metod obliczeniowych nowego typu aparatów do przeponowej wymiany ciepła z równoczesną rektyfikacją substancji. Praca spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r., dlatego wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

