

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

Białystok, 04.04.2022

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Kisielewskiego nt: „Dynamika przepływów wymiennika ciepła służącego do rektyfikacji substancji”.

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Mariusz Markowski, prof. Uczelni, promotorem pomocniczym jest: dr inż. Marian Trafczyński.

Podstawa przygotowania recenzji: pismo Dziekan Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej dr hab. inż. Renaty Walczak, prof. PW, z dnia 10.02.2022 roku.

Struktura pracy

Praca ma 107 stron, podzielona jest na 9 rozdziałów. Zawiera: streszczenie w języku polskim oraz angielskim, spis treści, spis oznaczeń oraz wykaz cytowanej literatury (135 pozycji w tym 1 praca, której współautorem jest mgr inż. Piotr Kisielewski). W rozdziale pierwszym omówiono genezę pracy. Rozdział drugi zawiera opis stosowanych konstrukcji układów do rozdzielania substancji. W rozdziale trzecim Autor pracy formułuje cel pracy oraz przedstawia jej zakres - formułuje hipotezy badawcze. W rozdziale czwartym przedstawiono model analityczny wymiennika H&MPE. Dynamika wymiennika H&MPE analizowana jest w rozdziale piątym. Ostateczne postacie układu równań zapisano w zależnościach (5.27) oraz (5.28). Wpływ dynamicznych zmian ciśnienia na funkcjonowanie aparatu omówiono w rozdziale 5.3. Schemat blokowy dla sąsiednich sekcji wymiennika H&MPE pokazano na rys.5.3 w rozdziale 5.5. Analizę dynamiki wymiennika H&MPE pracującego z mieszaniną propan-butan przedstawiono w rozdziale szóstym. Podano parametry pracy układu, parametry geometryczne wymiennika oraz przyjęte korelacje opisujące współczynniki przejmowania ciepła. W rozdziale siódmym wykorzystano model matematyczny wymiennika H&MPE do analizy układu pracującego w warunkach nieustalonych. W rozdziale ósmym Autor pracy zaproponował przyszłą modyfikację modelu. Schemat proponowanej zmiany został pokazany na rys.8.1. Rozdział dziewiąty zawiera wnioski.

Merytoryczna zawartość pracy

Autor pracy stwierdza, że głównym obszarem jego badań jest analiza dynamiki pracy wymiennika H&MPE, którego statyczny model zaproponowała w swojej pracy Pani dr inż. S. Storczyk. Zdaniem mgr inż. Piotra Kisielewskiego analiza dynamiki wymiennika H&MPE pozwoli na optymalizację wymiany ciepła oraz zmniejszy energochłonność rozdzielania substancji.

Opracowanie modelu zostało poprzedzone analizą stosowanych rozwiązań. Omówiono: konwencjonalny układ do rozdzielania substancji, w tym pokazano schemat ideowy kolumny CDiC oraz przedstawiono jej charakterystykę. Przedstawiono też metody ograniczenia energochłonności stosowane w procesie rektyfikacji oraz metody zwielokrotnionego efektu w wymianie ciepła w tym dostarczanie ciepła do reboilera następujące w wyniku skraplania oparów destylatu oraz podgrzewanie surowca. Przedstawiono przykład sekwencji rozdzielania substancji bezpośredniej i pośredniej. Omówiono charakterystykę kolumny destylacyjnej z przegrodą pionową, w tym charakterystykę kolumny DWC. Przedstawiono rozwiązania

dotyczące kolumn destylacyjnych wspomaganych sprężarką. Omówiono: bezpośrednie sprężanie oparów destylatu, sprężanie oparów cieczy wyczerpanej oraz sprężanie oparów czynnika pośredniczącego. Przedstawiono schematy diabatyckiej kolumny destylacyjnej oraz koncentrycznie cieplnie zintegrowanej kolumny destylacyjnej. Omówiono konfigurację wymiennika ciepła w układzie do rozdziału substancji. Przedstawiono schemat ideowy kolumny HiDiC, na następnych rysunkach schematy kolumny i-HiDiC oraz zintensyfikowanej kolumny i-HiDiC.

W pracy została omówiona dynamika aparatów do przeponowej wymiany ciepła i masy. Przedstawiono schemat blokowy sekcji wymiennika wykorzystywany do opisu jego dynamiki. W matematycznym opisie dynamiki wymiennika ciepła zastosowano model sekcyjny o parametrach skupionych, gdzie w każdej sekcji można wyodrębnić osiem transmitancji operatorowych. Pokazano schemat fragmentu kolumny przedstawiający przepływ strumieni cieczy i oparów oraz schemat blokowy opisujący dynamikę i-tej sekcji wymiennika. Omówiono dynamikę aparatów HiDiC, przedstawiono graficzny sposób wyznaczania wskaźników dynamicznych właściwości badanego obiektu. Przedstawiono również wybrane zagadnienia dotyczące osadów.

Autor pracy sformułował cel pracy, następująco „Celem przewodnim niniejszej dysertacji jest opracowanie i wykorzystanie modelu wymiennika H&MPE do analizy dynamiki rozważanego aparatu z uwzględnieniem uwarunkowań przemysłowych, takich jak, opory cieplne osadów oraz masa zatrzymanej cieczy w aparacie”. Przedstawiony harmonogram prac obejmował wyznaczenie parametrów termodynamicznych oraz geometrii aparatu w stanie ustalonym, utworzenie i testowanie modelu dynamiki wymiennika H&MPE oraz identyfikację i ocenę wpływu zmiany parametrów układu na dynamikę pracy wymiennika H&MPE. Pan mgr inż. Piotr Kisielewski sformułował dwie hipotezy badawcze:

- „Możliwe jest opracowanie uniwersalnego modelu dynamiki wymiennika H&MPE, gdzie kanały aparatu zbudowane są ze ścian o różnych kształtach, stosując: model idealnej kolumny opisany za pomocą profili kolumny, model oporów cieplnych w wymianie ciepła oraz model półki teoretycznej w wymianie masy.
- Możliwe jest opracowanie wymiennika H&MPE, utrzymującego stabilne parametry pracy przy zmiennych warunkach eksploatacyjnych, związanych ze zmianą masy cieczy zalegającej w aparacie oraz narażaniem osadów w aparacie.”

Zaproponowany przez Autora model wymiennika H&MPE oparty jest na modelu zaproponowanym w pracy doktorskiej dr inż. S. Storczyk pt. „Metoda obliczeniowa aparatu do przeponowej wymiany ciepła z równoczesną rektyfikacją substancji”. Model matematyczny uwzględniał teorię oporów cieplnych w przeponowej wymianie ciepła oraz model półki teoretycznej w termicznym rozdziale substancji. Model wymiennika H&MPE dotyczył integracji cieplnej części wzmacniającej i odpędowej dwóch kolumn.

W pracy pojęcie „półki teoretycznej” zastąpiono pojęciem „stopień kontaktu” („obszar o intensywnym mieszanii cieczy z oparami, gdzie występuje stan równowagi termodynamicznej”). Do obliczeń cieplnych zastosowano koncepcję wymiennika płytowego, który zastępował dwie zintegrowane cieplnie części kolumny. Przedstawiono równania opisujące wymianę ciepła, którą analizowano w sekcjach o określonych parametrach geometrycznych i przypisanych uśrednionych parametrach termodynamicznych. Równania bilansowe masy i ciepła oraz równania równowagi termodynamicznej pomiędzy oparami i cieczą zlinearyzowano wokół wartości średnich parametrów termodynamicznych. Linearyzacji równań dokonano poprzez ich rozwinięcie w szereg Taylora. Przyjęto, że odchyłki od wartości w stanie ustalonym są nowymi zmiennymi. Uzyskanie transmitancji operatorowej pozwoliło na modelowanie dynamiki wymiennika H&MPE w pobliżu wartości

średnich parametrów termodynamicznych. Zdefiniowano wielkości wejściowe i wyjściowe modelu matematycznego.

Opracowany w pracy model dynamiki wymiennika H&MPE zastosowano do symulacji procesu z mieszaniną propan-butan. Rozpatrywano dwie kolumny składające się z części wzmacniającej i odpędowej. Założono sprzężenie cieplne części wzmacniającej w pierwszej kolumnie z częścią odpędową w drugiej kolumnie w postaci wymiennika H&MPE o konstrukcji kanałowej. Wyznaczono profile kolumny dla części wzmacniającej oraz odpędowej. Przedstawiono również wartości poszczególnych parametrów intensywnych i ekstensywnych oraz właściwości substancji w zależności od numeru sekcji kanału.

W analizie pracy układu w warunkach nieustalonych badano zakłócenie w postaci:

- zmiany ciśnienia w części wzmacniającej aparatu,
- zmiany strumienia masowego oparów wpływających do części wzmacniającej.
- zmiany strumienia masowego cieczy wpływającej do części odpędowej.

Wyniki symulacji pokazały, że zmiana powyższych parametrów wywołała niewielkie zmiany składu produktów, maksymalnie o 2.6%. Analizowano również wrażliwość aparatu na stopień zanieczyszczenia osadami. Wyniki symulacji pokazały, że zmiana powyższych parametrów wywołała niewielkie zmiany składu produktów (destylatu oraz cieczy wyczerpanej).

Autor pracy zaproponował przyszłą modyfikację modelu wg technologii stosowanej powszechnie w przemyśle. Mgr inż. Piotr Kisielewski podsumowując wyniki symulacji stwierdził, że nie dają one podstaw do odrzucenia hipotezy mówiącej, że opisywany w pracy wymiennik H&MPE jest dynamicznie stabilny.

Uwagi krytyczne

Autor pracy w rozdziale „Dynamika aparatów do wymiany ciepła i masy – HIDiC” przedstawia wyniki badań dynamiki aparatów HIDiC. Przytacza między innymi wyniki uzyskane w pracy [52], stwierdza: „W pracy [52] do budowy modelu dynamiki kolumny i-HIDiC wykorzystali równania bilansu masy i energii przy założeniu równowagi termodynamicznej ciec - opary. W badaniach zaobserwowano dużą nieliniowość pomiędzy sygnałami wejściowymi i wyjściowymi w stanie dynamicznym, np. współczynnik wzmocnienia w stanie ustalonym rośnie w różnych warunkach pracy.”

W proponowanym w pracy modelu usunięto nieliniowość i badano stabilność układu liniowego. Uważam, że kwestia wpływu nieliniowości równań na stabilność układu powinna być przedyskutowana w trakcie obrony poprzez bardziej szczegółowe omówienie rezultatów takich badań przeprowadzonych przez innych badaczy w odniesieniu do aparatów HIDiC.

Na rys.73, 7.4, 7.5, 7.6, kształt krzywej będącej odpowiedzią układu na zaburzenie przy 5% jego wielkości jest nieznacznie różny od pozostałych krzywych. Proszę o skomentowanie powodu występowania tych różnic.

Wybrane uwagi redakcyjne

Język pracy generalnie jest poprawny, praca zawiera drobne błędy redakcyjne, które jednak nie umniejszają uzyskanych rezultatów.

Wybrane uwagi:

- W spisie treści brak rozdziałów: 2.3.3. oraz 2.3.4.
- Brak komentarzy pod wykresami prezentującymi zmiany parametrów w poszczególnych sekcjach (rys. 6.3 ÷ 6.18).

- Używano sformułowania: „schemat blokowy dynamiki” – powinno być schemat blokowy opisujący dynamikę wymiennika.

Podsumowanie

Przedstawiona do oceny praca doktorska jest pracą teoretyczną. W pracy opracowano matematyczny model dynamiki niezastosowanego dotąd w przemyśle wymiennika kanałowego (H&MPE). Celem pracy było zbadanie stabilności pracy wymiennika w przypadku zmian warunków jego eksploatacji. Badano wpływ zmian warunków eksploatacji na zachowanie wymaganej czystości rozdzielanych produktów. Uzyskane wyniki analiz wskazały kierunki dalszych prac. Uważam, że rezultaty pracy doprowadzą do zastosowania rozwiązania w instalacjach przemysłowych. Tym samym założony cel pracy został zrealizowany. Uważam, że praca zasługuje na wyróżnienie.

Praca spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim – w art.187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, dlatego wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

