

Janusz DZIAK, Magdalena KUBALA, Jacek KAPŁON, Wojciech LUDWIG

e-mail: janusz.dziak@pwr.wroc.pl

Zakład Inżynierii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław

Wyznaczanie współczynników wnikania masy podczas odparowania cienkowarstwowego roztworu przy wykorzystaniu wyników destylacji lub wyników badań ruchu ciepła

Wstęp

Ruch ciepła i masy podczas odparowania cieczy jednoskładnikowych i ciekłych roztworów w wyparce cienkowarstwowkowej, ze względu na swoją złożoność i ważność zastosowań (odparowanie cieczy wrażliwych termicznie, możliwość odparowywania cieczy o dużej lepkości) jest ciągle w sferze zainteresowania naukowców i praktyków. *J.W. Palen, Qi Wang i J.C. Chen* w swojej pracy [1], poświęconej odparowaniu wodnego roztworowi glikolu propylenowego, stwierdzili słabą zależność współczynnika wnikania ciepła od obciążenia cieplnego ogrzewanej powierzchni i intensywności jej zraszania oraz silną zależność od składu roztworu. *C.R.F. Pacheco* oraz *L.S.M. Frioni* [2] opisali wyniki swoich badań dotyczących cienkowarstwowego odparowywania roztworów sacharozu. W swojej pracy wykazali silny wpływ lepkości roztworu na współczynnik wnikania ciepła. Wiele uwagi poświęca się również modelowaniu procesu destylacji cienkowarstwowkowej [3, 4]. Wciąż trwają prace nad opracowaniem ogólnej zależności na współczynnik wnikania ciepła, która byłaby dostatecznie pewna i dogodna dla praktycznych obliczeń [5, 6]. W niniejszej pracy omówiono zagadnienia ruchu ciepła i masy podczas cienkowarstwowego wrzenia roztworów alkohol izopropylowy-woda. Wykazano, że wykorzystanie wyników destylacji (stężen otrzymanych cieczy), jak i wyników badań ruchu ciepła jest równocześnie dla określenia wartości współczynników wnikania masy podczas odparowania ciekłych roztworów w warunkach istnienia oporów dla ruchu masy w cieczy.

Teorie opisujące odparowanie ciekłych roztworów z cienkiej warstwy

Teoria Billeta cienkowarstwowego odparowania roztworów

Do określenia wyników destylacji w wyparce cienkowarstwowkowej powszechnie stosuje się teorię *Billeta* [7]. Prowadzi ona do równania (1), pozwalającego obliczyć natężenie przepływu cieczy wyczerpanej L_w pod warunkiem, że znamy natężenie przepływu surowca L_s , jego stężenie x_s oraz zadane jest stężenie cieczy wyczerpanej x_w . Niezbędne są również dane równowagowe ciecz – para $y^* = f(x)$.

$$\ln \frac{L_s}{L_w} = \int_{x_w}^{x_s} \frac{dx}{y^* - x} \quad (1)$$

Średni skład destylatu można określić z równania bilansowego:

$$x_D = \frac{L_s x_s - L_w x_w}{D} \quad (2)$$

Teoria Gröppa i Schlündera uwzględniająca ruch masy w cieczy podczas cienkowarstwowego odparowania roztworów

Według *Gröppa* i *Schlündera* [8] w określonych warunkach prowadzenia procesu odparowania roztworu, przy granicy faz ciecz – para, od strony cieczy, tworzy się gradient stężenia na skutek istnienia oporu dla ruchu masy w cieczy. Spowodowane jest to tym, że składnik lotniejszy ubywa szybciej na granicy faz ciecz – para, niż jest dostarczany do granicy faz z głębi cieczy. Ułamek molowy składnika lotniejszego (przy granicy faz) w gazie y_{Aph} i w cieczy x_{Aph} oraz temperatura wrzenia na granicy faz T_{ph} związane są równowagą termodynamiczną.

Współczynnik wnikania masy w cieczy *Gröpp* i *Schlünder* proponują obliczać z równania

$$\ln \frac{y_{Aph} - x_A}{y_{Aph} - x_{Aph}} = -\frac{\nu_L}{\beta_L} \quad (3)$$

gdzie: ν_L – liniowa prędkość cieczy w kierunku granicy faz obliczana z zależności (4), x_A – ułamek molowy składnika lotniejszego w rdzeniu cieczy,

$$\nu_L = \frac{n'}{\rho_L} = \frac{q}{\rho_L r} \quad (4)$$

gdzie: q – obciążenie cieplne powierzchni grzejnej wyparki, [kW/m²], r – ciepło parowania cieczy [kJ/kmol], ρ_L – gęstość molowa cieczy [kmol/m³].

Gröpp i *Schlünder* zauważyli, że wartości współczynników wnikania ciepła ustalone doświadczalnie podczas odparowania roztworów są niższe od obliczonych z korelacji dostępnych w literaturze. Wartości obliczane z korelacji nazwali oni idealnymi wartościami współczynników wnikania ciepła, gdyż otrzymane one zostały z badań odparowania cieczy jednoskładnikowych tzn. w warunkach braku oporu dla ruchu masy w cieczy. Z teorii *Gröppa* i *Schlündera* można ustalić równanie

$$T_{ph} = T_N + \frac{(\alpha_{id} - \alpha)q}{\alpha_{id}\alpha} \quad (5)$$

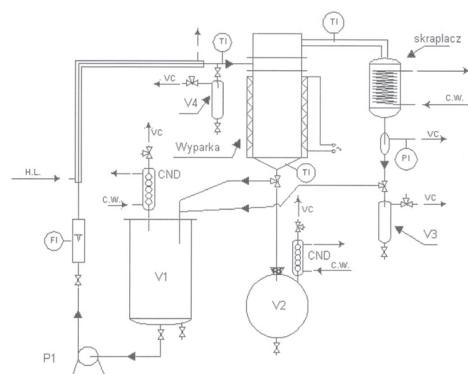
T_N oznacza temperaturę wrzenia roztworu o znanym składzie x_A , pozwalające obliczać temperaturę na granicy faz ciecz – para dla wrzącego roztworu w warunkach istnienia oporu dla ruchu masy w cieczy, przy znajomości wartości współczynników wnikania ciepła α , ustalonych dla wrzenia roztworu, oraz wartości idealnych współczynników wnikania ciepła α_{id} , obliczonych z korelacji dla własności cieczy takich jak dla badanego roztworu.

Znając wartość temperatury cieczy na granicy faz T_{ph} można ustalić skład równowagowy roztworu na granicy faz i w następnej kolejności obliczyć wartość współczynnika wnikania masy w cieczy z równ. (3).

Badania eksperymentalne

Instalacja badawcza

Badania eksperymentalne procesu destylacji roztworów izopropanol – woda oraz badania ruchu ciepła podczas odparowania roztworów przeprowadzono w instalacji przedstawionej na rys. 1. Sposób postępowania opisano w pracy [9].



Rys. 1. Instalacja do badań ruchu ciepła przy cienkowarstwowym wrzeniu cieczy: P1 – pompa cyrkulacyjna, V1 – zbiornik surowca, V2 – zbiornik cieczy wyczerpanej, V3 – zbiornik destylatu, V4 – odbiornik próbek surowca, CND – chłodnica

Podstawowe dane wyparki, stosowanej w badaniach: wyparka z grawitacyjnym spływem cieczy o powierzchni wymiany ciepła $A = 0,07 \text{ m}^2$, wysokości $0,557 \text{ m}$ i średnicy wewnętrznej $0,04 \text{ m}$.

Układ pomiarowy

Wykonano 36 destylacji roztworów alkohol izopropylowy – woda. Destylacje wykonano pod ciśnieniem atmosferycznym. Zakres stężeń alkoholu w surowcu: $x_{AS} = 0,0678 \div 0,1333 \text{ [mol/mol]}$. Zakres intensywności zraszania powierzchni grzejnej wyparki: $\Gamma = 0,065 \div 0,213 \text{ [kg/(m}\cdot\text{s)]}$. Zakres obciążenia cieplnego wyparki: $q = 8,088 \div 29,839 \text{ [kW/m}^2\text{]}$. Ustalono wyniki destylacji oraz wartości współczynników wnikania ciepła podczas wrzenia roztw. alkohol izopropylowy – woda.

Określono wartości współczynników wnikania ciepła przy wrzeniu ciekowarstewkowym cieczy jednoskładnikowych: woda, alkohol metylowy, alkohol izopropylowy.

Wyniki badań

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na rys. 2–4. Stężenia destylatu, określone jako teoretyczne na rys. 2 obliczono korzystając z teorii *Billeta* opisaną powyżej.

Na podstawie wyników badań ruchu ciepła podczas wrzenia cieczy jednoskładnikowych (woda, alkohol metylowy oraz alkohol izopropylowy) opracowano korelację do obliczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas ciekowarstewkowego wrzenia cieczy w pionowej, grawitacyjnej wyparce ciekowarstewkowej typu statycznego:

$$Nu = 2,85286 \cdot 10^7 \left(\frac{\sqrt{We}}{Re} \right)^{0,002582} \left(\frac{Fr}{Ec} \right)^{-0,67748} K^{-1,01041} Pr^{-0,73103} Re_{cr}^{0,046663} \quad (6)$$

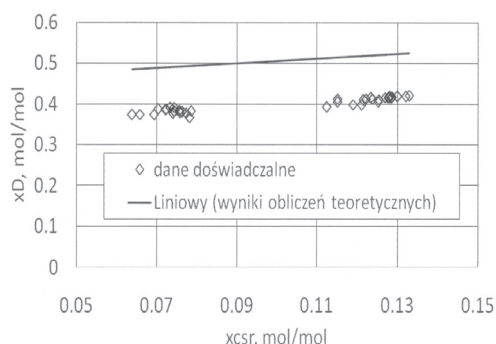
Średni błąd względny współczynnika wnikania ciepła obliczonego z korelacji (6) dla 165 danych pomiarowych wynosi $\delta = 10,8\%$.

Wyniki badań ruchu ciepła podczas odparowywania ciekowarstewkowego roztworów izopropanol – woda opisano równaniem

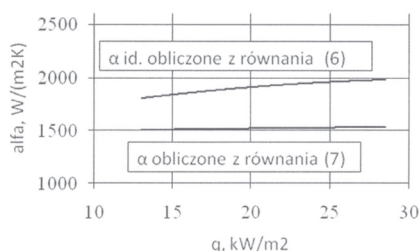
$$\alpha_{izopropanol-woda} = (-214285x_A^2 + 39805,3x_A - 14,697)(1,2446\Gamma^{0,1102}) \cdot (0,00058853q^2 - 0,00207647q + 1,02108) \quad (7)$$

Średni błąd względny współczynnika wnikania ciepła obliczonego z równania (7) dla 36 danych pomiarowych wynosi $\delta = 6,1\%$.

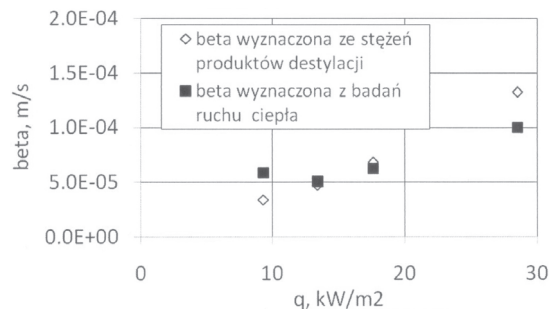
Na rys. 3 przedstawiono porównanie wartości współczynników wnikania ciepła otrzymanych z korelacji (6) i obliczonych z równania (7).



Rys. 2. Zależność stężenia destylatu od średniego stężenia cieczy



Rys. 3. Porównanie wartości współczynników wnikania ciepła, wyznaczonych z korelacji [6] i równania [7] dla $x = 0,13 \text{ mol/mol}$ i $\Gamma = 0,08 \text{ kg/(ms)}$



Rys. 4. Porównanie wartości współczynników wnikania masy β , wyznaczonych z wyników destylacji i ustalonych z badań ruchu ciepła dla $x = 0,13 \text{ mol/mol}$ i $\Gamma = 0,08 \text{ kg/(ms)}$

Na rys. 4 porównano wartości współczynników wnikania masy, otrzymane z badań ruchu ciepła podczas destylacji ciekowarstewkowej roztworów izopropanol – woda, z wartościami współczynników wnikania masy, otrzymanymi ze znanych składów destylatu i składu cieczy podczas destylacji ciekowarstewkowej.

Wnioski

Wartości eksperymentalne stężenia destylatu są mniejsze od wartości obliczonych z teorii *Billeta*.

Wartości współczynnika wnikania ciepła, uzyskane z korelacji są większe od otrzymanych z równania opisującego wyniki badań ruchu ciepła przy wrzeniu roztworu.

Wskazuje to na występowanie oporów wnikania masy w cieczy podczas destylacji ciekowarstewkowej w układzie alkohol izopropylowy – woda.

Wartości współczynników wnikania masy β wyznaczone z teorii *Gröppa* i *Schlündera*, otrzymane dwiema różnymi metodami: 1. z wykorzystaniem znajomości wartości współczynników wnikania ciepła otrzymanych z korelacji (6) i równania (7), 2. wyznaczone z wykorzystaniem, eksperymentalnie ustalonego składu destylatu mają zbliżone wartości.

Oznaczenia

C_p – ciepło właściwe, $[J/(kg\cdot K)]$, Γ – jedn. intensyw. zrasz., $[kg/(m\cdot s)]$, g – przyśp. ziemskie, $[m/s^2]$, r – ciepło parowania, $[J/kg]$, $\vartheta_z = [\eta^2 / (\rho^2 g)]^{1/3}$ – zastępczy wymiar poprzeczny, $[m]$, w – prędkość, $[m/s]$, α – współczynnik wnikania ciepła, $[W/(m^2\cdot K)]$, η – lepkość dynamiczna, $[Pa\cdot s]$, γ – ciężar właściwy, $[kg/m^3]$, ρ – gęstość, $[kg/m^3]$, σ – napięcie powierzchniowe, $[N/m]$

Moduły

liczba Eckerta $Ec = \frac{w^2}{C_p \Delta T}$, liczba Frouda $Fr = \frac{w^2}{gd}$,
 liczba kondensacji $K = \frac{r}{C_p \Delta T}$, liczba Nusselta $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$,
 liczba Prandtla $Pr = \frac{C_p \eta}{\lambda}$,
 liczba Reynoldsa $Re = \frac{wd\rho}{\eta}$, (dla zraszania) $Re_{cr} = \frac{4\Gamma}{\eta}$,
 liczba Webera $We = \frac{\rho w^2 d}{\sigma}$, (zastępcza) $We_z = \frac{\sigma}{\gamma \vartheta_z^2}$.

LITERATURA

- [1] J.W. Palen, Qi Wang, J.C. Chen: AICHE Journal, **40**, No. 2, 207 (1994).
- [2] C.R.F. Pacheco, L.S.M. Frioni: J. Food Eng., **64**, 471 (2004).
- [3] M. El Haj Assad, M.J. Lampinen: Int. J. Refrigeration, **25**, 985 (2002).
- [4] W. Ludwig, J. Dziak, W. Sawiński, L. Królikowski, J. Kapłon, J. Tuta: Chemical and Process Engineering, **29**, 215 (2008).
- [5] A.A. Alhusseini, K. Tuzla, J.C. Chen: Int. J. Heat Mass Transfer, **41**, No. 12, 1623 (1998).
- [6] R. Krupiczka, A. Rotkegel, Z. Ziobrowski: Chem.Eng. Proc., **43**, 949 (2004).
- [7] R. Biller: Chemie Ing. Techn., **1**, No. 9 (1974).
- [8] U. Gröpp, E. S. Schlünder: Chem. Eng. Proc., **20**, No. 2, 103 (1986).
- [9] J. Dziak: Praca doktorska, Politechnika Wroclawska (1996).