

Joanna WILK

e-mail: joanwilk@prz.edu.pl

Katedra Termodynamiki, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

## Pomiary elektrolityczne rozkładu współczynnika wymiany masy w krótkim minikanale

### Wstęp

Miniaturyzacja elementów urządzeń oraz samych urządzeń stosowanych w przemyśle jak również wiele nowych zastosowań w medycynie (np. kompaktowe wymienniki ciepła, radiatory, mikro- i mini-pompy, układy precyzyjnego dozowania substancji chemicznych) powoduje konieczność prowadzenia badań pewnych zjawisk fizycznych, których przebieg jest związany ze skalą procesu. Do takich zjawisk należy m.in. konwekcyjna wymiana masy i ciepła zachodząca w kanałach o małych przekrojach.

Temat ten jest obecnie szeroko podejmowany przez badaczy. Badane zagadnienia dotyczą przede wszystkim mikrokanalów – czyli kanałów o średnicach hydraulicznych mniejszych niż 200 mikrometrów, gdzie okazuje się, wpływ miniaturyzacji na procesy fizyczne jest znaczny. W kanałach o większych przekrojach czyli minikanalach ( $3 \text{ mm} > d_h > 0,2 \text{ mm}$ ) również stwierdzono [Kandlikar i in., 2006], że wzory kryterialne stosowane w przypadku kanałów o wymiarach konwencjonalnych, nie zawsze mogą być stosowane. Wyniki badań eksperymentalnych a także obliczeń numerycznych dostępne w literaturze dotyczą kanałów o małych przekrojach i stosunkowo dużych długościach, a więc obejmują przypadki konwekcyjnej wymiany masy i ciepła poza obszarem rozbiegu hydraulicznego i termicznego.

W prezentowanej pracy podjęto próbę określenia zmiany współczynnika wymiany masy na długości okrągłego minikanalu o średnicy 1,5 mm i długości 15 mm, którego powierzchnia wewnętrzna stanowiła katodę w procesie elektrolizy zachodzącej podczas laminarnego przepływu elektrolitu przez kanał. Określenie rozkładu współczynnika wymiany masy może posłużyć do wyznaczenia rozkładu współczynnika wymiany ciepła przy użyciu analogii wymiany masy i ciepła.

### Stanowisko badawcze i metodyka pomiarów

Badania wymiany masy w krótkim minikanale zostały przeprowadzone z zastosowaniem techniki elektrolitycznej, wykorzystującej zjawisko dyfuzji kontrolowanej podczas procesu elektrolizy. Transport jonów w tym przypadku odbywa się poprzez dyfuzję, migrację oraz konwekcję. Jeżeli pominiemy strumienie jonów: konwekcyjny (bardzo niewielki) oraz migracyjny, który można zmniejszyć dobierając odpowiednie stężenie elektrolitu podstawowego – wtedy wymiana masy odbywa się poprzez dyfuzję przy powierzchni elektrody.

Wykorzystując prawo Faradaya'ego do określenia wartości natężenia prądu w obwodzie zewnętrznym dla układu z elektrolitem, jeżeli do anody i katody jest przyłożone napięcie; prawo Ficka dla wymiany masy przez dyfuzję; oraz model Nernsta do określenia stężenia jonów przy powierzchni elektrody – otrzymuje się zależność

$$I = AnFh_D(C_b - C_w) \quad (1)$$

gdzie:

- $I$  – natężenie prądu w obwodzie zewnętrznym, [A]
- $A$  – pole powierzchni elektrody (katody), [ $\text{m}^2$ ]
- $n$  – elektronowość reakcji elektrodowej, [-]
- $F$  – stała Faradaya,  $96493 \cdot 10^3$  [As/kmol]
- $h_D$  – współczynnik wymiany masy, [m/s]
- $C_b, C_w$  – stężenie roboczych jonów w elektrolicie, odpowiednio w masie elektrolitu i przy powierzchni elektrody, [kmol/ $\text{m}^3$ ].

Zwiększanie napięcie przyłożonego z zewnątrz do elektrod będzie powodowało spadek stężenia jonów przy powierzchni elektrody. Jeżeli powierzchnia anody jest znacznie większa od powierzchni katody to można osiągnąć stan, w którym  $C_w = 0$ . Pojawia się wówczas kontrolowana dyfuzja jonów przy katodzie, a współczynnik wymiany masy można obliczyć z zależności

$$h_D = I_p / (nFA C_b) \quad (2)$$

gdzie:

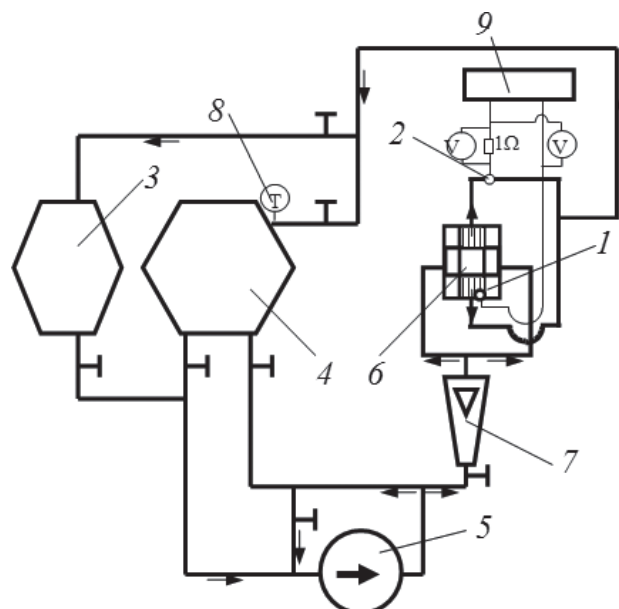
$I_p$  – natężenie prądu plateau – płaski odcinek na krzywej polaryzacyjnej (rys. 2).

W zastosowanej technice pomiarowej, jako elektrolit został użyty wodny roztwór równomolowej mieszaniny  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  i  $\text{K}_4(\text{Fe})_6$  w obecności jednorodnego roztworu NaOH jako elektrolitu podstawowego. Proces oksydacyjno-redukcyjny w tym przypadku opisuje reakcja



Aby zminimalizować inne reakcje będące źródłem błędów pomiarowych np. reakcje redukcji tlenu na katodzie czy reakcje występujące pod wpływem światła, elektrolit był płukany azotem.

Do eksperymentu wykorzystano uniwersalne stanowisko pomiarowe Katedry Termodynamiki z sekcją pomiarową do badań wirników wysokoobrotowych wymienników ciepła [Bieniasz, 2005] przedstawione schematycznie na rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego z zaznaczonym kierunkiem przepływu elektrolitu

W sekcji pomiarowej umieszczono modelowy pierścień z wydrążonymi promieniowo minikanalami, powierzchnia wewnętrzna wybranych minikanalów stanowiła katodę – 1 dla procesu elektrolitycznego. Anodę – 2 stanowiły równoległe połączone dwie blachy niklowe przyklejone do wewnętrznych powierzchni kolektorów wylotowych sekcji

pomiarowej. Przed pomiarami właściwymi powierzchnie elektrod były uaktywniane przy użyciu elektrolitu ze zbiornika – 3. W czasie pomiarów właściwych elektrolit pompowany ze zbiornika głównego – 4 pompą – 5, przy zamkniętych odpowiednich zaworach, wpływał z dwóch stron do sekcji pomiarowej – 6, jak zaznaczono na rys. 1. Natężenie strumienia elektrolitu przepływającego przez cały pierścień z minikanalami był mierzony za pomocą rotametu – 7. Natężenie przepływu przez pojedynczy kanał obliczono – wykorzystując założenie o identyczności wszystkich kanałów w pierścieniu oraz teoretyczne wyprowadzenie twierdzenia o równości prędkości wylotowych cieczy z kanałów [Bie-niasz B. 2005, Wilk J., 2009] – dzieląc wartość natężenia całkowitego przez liczbę kanałków. Obliczone na tej podstawie liczby *Reynoldsa* zmieniały się w zakresie od 110,5 do 442.

W układzie utrzymywano stałą temperaturę elektrolitu, której pomiar odbywał się za pomocą termometru termoelektrycznego – 8. Zmianę napięcia pomiędzy anodą i katodą otrzymywano poprzez zasilacz regulowany prądu stałego – 9.

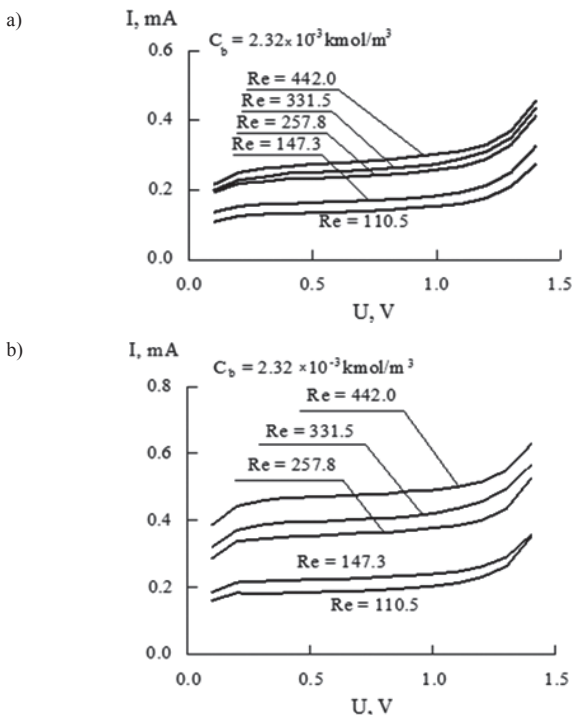
Aby badać rozkład współczynnika wymiany masy, zastosowano katody w postaci niklowych tulejek umieszczonych w odpowiednio roz-wierconych minikanalach. Długości katod wynosiły: 1*L*, 3/4*L*, 1/2*L*, 1/4*L*, gdzie *L* = 15 mm – długość minikanalu (szerokość pierścienia). Wlot niklowej rurki zawsze znajdował się od strony wpływu elektrolitu. Szczegółowy opis zastosowanego pierścienia zamieszczono w pracy [Wilk, 2009], gdzie przedstawiono wyniki badań średnich współczynni-ków wymiany masy i ciepła w danym minikanale.

W trakcie badań uszkodzeniu uległa katoda o długości 1/2*L*, co unie-możliwiło otrzymanie pełnych wyników pomiarowych.

Molowe stężenie elektrolitu *C<sub>b</sub>* niezbędne do obliczeń współczynni-ków wymiany masy zgodnie z zależnością (2) zmierzono metodą mia-reczkowania jodometrycznego.

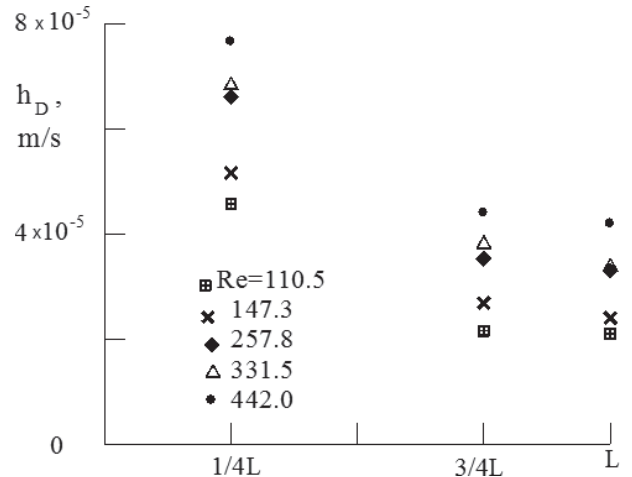
### Wyniki badań

W efekcie przeprowadzonych badań uzyskano krzywe polaryzacyj-ne dla określonych długości katod przy różnym natężeniu przepływu elektrolitu oraz dla różnych położen kątowych katod na obwodzie pierścienia z minikanalami. Przykładowe krzywe polaryzacyjne uzyskane w jednym położeniu badanych katod na obwodzie pierścienia zostały przedstawione na rys. 2.



Rys. 2. Krzywe polaryzacyjne dla katod: a) o długości 1/4*L* oraz b) o długości 3/4*L* w wybranym położeniu pomiarowym na obwodzie pierścienia

Na rys. 3 przedstawiono rozkład średnich wartości współczynnika wymiany masy wzdłuż długości krótkiego minikanalu. Wartości *h<sub>D</sub>* zostały obliczone wg zależności (2) dla średnich wartości prądów *I<sub>p</sub>* otrzy-manych podczas dyfuzji kontrolowanej przy odpowiednich katodach usytuowanych w różnych położeniach pomiarowych. Na wykresie brak punktów pomiarowych dla uszkodzonej katody o długości 1/2*L*.



Rys. 3. Rozkład średnich wartości współczynnika wymiany masy wzdłuż długości minikanalu dla różnych liczb *Reynoldsa*

Dysponując wartościami współczynnika wymiany masy *h<sub>D</sub>* obliczo-no wartości liczby *Sherwooda*, zgodnie z zależnością:

$$Sh = h_D d_H / D \quad (3)$$

gdzie

*D* – współczynnik dyfuzji jonów w elektrolicie, przyjęto *D* = 6,71 · 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s, na podstawie danych literaturowych [Hop-kowicz, Pietrzyk, 1977] umożliwiających obliczenie *D* w zależności od temperatury elektrolitu.

Otrzymane wyniki porównano z danymi uzyskanymi według roz-wiązania *Graetz-Leveque'a* [Acosta i inni 1985] dla wymiany masy w odcinku wlotowym przewodu rurowego:

$$Sh = 1,85(Re Sc d_H/x)^{1/3} \quad (4)$$

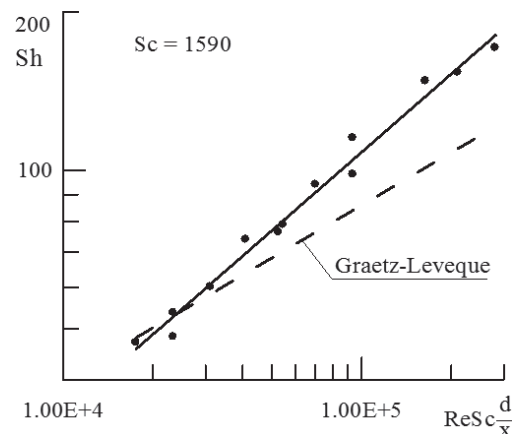
gdzie:

*Sc* = *vD* – liczba *Schmidta*

*x* – odległość od wlotu kanału,

*v* – współczynnik lepkości kinematycznej badanego elektrolitu w temperaturze 25°C.

Rys. 4 prezentuje obliczone liczby *Sh* na podstawie wyników ekspe-rymentu (czarne punkty) w odniesieniu do rozwiązania *Graetz-Leve-que'a*.



Rys. 4. Wyniki badań eksperymentalnych w porównaniu z rozwiązaniem dla kanału o wymiarach konwencjonalnych

Linia ciągła będąca aproksymacją wyników pomiarów świadczy o możliwości zapisu rezultatów w postaci korelacji  $Sh = A(ReSc d_p/x)^B$ .

Jednak określenie dokładnych wartości współczynników A i B wymaga przeprowadzenia kolejnych badań dla większej liczby elementów minikanalu – katod o różnych długościach.

### Wnioski

Na podstawie wyników eksperymentu można wnioskować o intensyfikacji wymiany masy przy laminarnym przepływie przez krótki minikanal w porównaniu z wymianą masy w kanale o wymiarach konwencjonalnych.

Przeprowadzone badania są badaniami wstępnymi, a w celu uzyskania pełnej korelacji opisującej rozkład współczynnika wymiany masy przewiduje się przeprowadzenie dalszych badań elektrolitycznych na zmodyfikowanym pierścieniu z minikanalami o różnych długościach.

### LITERATURA

- Acosta R.E., Muller R.H., Tobias C.W., 1985. Transport processes in narrow (capillary) channels. *AIChE Journal* **31**, nr 3, 473-482
- Bieniasz B. 2005. *Konwekcyjna wymiana masy/ciepła w płytkowych wirnikach regeneratora obrotowego*. Oficyna Wyd. PRz, Rzeszów
- Hopkovicz M., Pietrzyk Z., 1977. *Inżynieria Chemiczna VII*, nr 4
- Kandlikar S.G. i in., 2006. *Heat Transfer and Fluid Flow In Minichannels and Microchannels*. Elsevier, Kidlington, Oxford
- Wilk J., 2009. Experimental investigation of convective mass/heat transfer in short minichannel at low Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science* **33**, nr 2, 267-272

**Pracę wykonano przy użyciu aparatury zakupionej w projekcie POPW.01.03.00-18-012/09 z Funduszy Strukturalnych w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej współfinansowanego przez UE ze środków Funduszu Rozwoju Regionalnego.**

## RZETELNOŚĆ W NAUCE

(wg Polskiej Bibliografii Naukowej – portalu gromadzącego informacje dotyczące czasopism naukowych oraz publikacji autorstwa polskich naukowców. Portal ten jest częścią Systemu Informacji o Szkolnictwie Wyższym)

<https://pbn.nauka.gov.pl>

Rzetelność w nauce stanowi jeden z jej jakościowych fundamentów. Czytelnicy powinni mieć pewność, iż autorzy publikacji w sposób przejrzysty, rzetelny i uczciwy prezentują rezultaty swojej pracy, niezależnie od tego, czy są jej bezpośrednimi autorami, czy też korzystali z pomocy wyspecjalizowanego podmiotu (osoby fizycznej lub prawnej). Dowodem etycznej postawy pracownika naukowego oraz najwyższych standardów redakcyjnych powinna być jawność informacji o podmiotach przyczyniających się do powstania publikacji (wkład merytoryczny, rzeczowy, finansowy etc.), co jest przejawem nie tylko dobrych obyczajów, ale także społecznej odpowiedzialności.

Przykładami przeciwnymi są „ghostwriting” i „guest authorship”. Z „ghostwriting” mamy do czynienia wówczas, gdy ktoś wniósł istotny wkład w powstanie publikacji, bez ujawnienia swojego udziału jako jeden z autorów lub bez wymienienia jego roli w podziękowaniach zamieszczonych w publikacji. Z „guest authorship” („honorary authorship”) mamy do czynienia wówczas, gdy udział autora jest znikomy lub w ogóle nie miał miejsca, a pomimo to jest autorem/współautorem publikacji.

Redakcja czasopisma „INŻYNIERIA I APARATURA CHEMICZNA” informuje, że czyni starania, aby wdrożyć procedurę zabezpieczającą przed zjawiskami nierzetelności w nauce, a wszelkie wykryte przypadki łamania i naruszania zasad etyki obowiązujących w nauce zgodnie z zaleceniami będą demaskowane, włącznie z powiadomieniem odpowiednich podmiotów (jak instytucje zatrudniające autorów, towarzystwa naukowe, stowarzyszenia edytorów naukowych itp.).