

Mariola BŁASZCZYK, Jerzy SĘK, Marek DZIUBIŃSKI

e-mail: jerzysek@p.lodz.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Badania procesu ciśnieniowej elucji substancji wysokolepkich ze struktur porowatych

Wstęp

Zagadnienia obejmujące wielofazowe przepływy w mediach porowatych mają istotne znaczenie w wielu naukowych i inżynierskich dyscyplinach [Hewitt, 1996]. Procesy przepływu substancji wysokolepkich wewnątrz struktur porowatych odgrywają szczególną rolę, z technologicznego punktu widzenia, w inżynierii wydobywania ropy naftowej, gdzie przepływ wielofazowy występuje naturalnie w skałach roponośnych lub podczas różnego rodzaju metod odzyskiwania ropy. W metodach tych stosuje się wstrzykiwanie wody wraz z różnymi środkami powierzchniowo czynnymi do wnętrza skały roponośnej w celu zwiększenia mobilności zalegających substancji o większej lepkości [Mohanty i Hirasaki, 2001].

Badania hydrodynamiki przepływu substancji wysokolepkich, węglowodorów i pochodnych ropy naftowej, w złożach ziarnistych mają także zastosowanie w procesach remediacji gleb [Khan i in., 2004]. Istotne jest tutaj poznanie mechanizmów wnikania i transportu tych substancji w głąb porowatych struktur gruntów jako potencjalnych dróg zanieczyszczeń [Gworek, 2004]. Znajomość tych zjawisk zachodzących w gruntach, pozwala także przewidzieć stopień skażenia wód podziemnych substancjami olejowymi przedostającymi się z gleby. Wiedza dotycząca procesów elucji ciśnieniowej jest także szczególnie przydatna podczas modelowania procesów oczyszczania zaolejonych koalesców i filtrów.

Celem niniejszej pracy było przedstawienie zależności zmian przepuszczalności złoża w czasie wypłukiwania z niego substancji o wysokiej lepkości za pomocą czynnika myjącego. Do opisu tego zjawiska zastosowano teorię Kozeny'ego-Carmana i zaproponowano uniwersalną zależność pozwalającą na podstawie wartości natężenia wypływającej cieczy przewidzieć jakie ciśnienie występuje na wlocie do złoża.

Stanowisko i procedura badawcza

Badania wykonane zostały na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Ciecz myjąca znajdowała się w zbiorniku – 1 i była przepompowywana do kolumny doświadczalnej – 5 za pomocą pompy perystaltycznej – 4 przy zadanej częstotliwości obrotowej. Na wlocie do kolumny zamontowany był przetwornik pomiarowy typu PT-5261 – 3, służący do rejestrowania zmian ciśnienia stawianego przez zaolejone złożo podczas przepływu cieczy, połączony z miernikiem tablicowym typu MD-5270 – 2. Kolumnę doświadczalną stanowił cylinder o długości 0,3 m i średnicy 0,05 m, w którym na wlocie i wylocie zamontowane były kołnierze wraz z siatkami metalowymi utrzymującymi złożo. Ciecz wypływająca ze złoża odbierana była do zlewek o określonej pojemności.

Złożo ziarniste stanowiły mikrokulki szklane o średnicach z zakresu 200÷300 μm tworzące warstwy o porowatości $\varepsilon = 0,32$. Przed umieszczeniem złoża ziarnistego w kolumnie było ono nasączone różnymi ilościami modelowych substancji wysokolepkich w ilościach 100, 150 oraz 180 ml takich jak olej roślinny – OR, olej parafinowy – OP i olej

silikonowy – OS. Przy podanych ilościach olejów początkowe porowatości nasyconego nimi złoża wynosiły odpowiednio 0,15; 0,065 oraz 0,014. Właściwości fizykochemiczne stosowanych mediów zostały przedstawione w tab. 1. Dla każdego pomiaru przygotowywane było nowe złożo, jego masa wynosiła za każdym razem 0,78 kg. Ciecz myjącą stanowiła woda wodociągowa. Pomiary prowadzono w temperaturze otoczenia wynoszącej około 25°C. Przepływ cieczy przez zaolejone złożo był przeprowadzany nominalnej pompy równej $Q = 7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Pomiarów zmian ciśnienia stawianego przez złożo w trakcie przepływu cieczy dokonywano w odstępach czasu co 30 sekund. W celu zmierzenia rzeczywistych natężeń przepływu cieczy w kolumnie stosowano metodę objętościową.

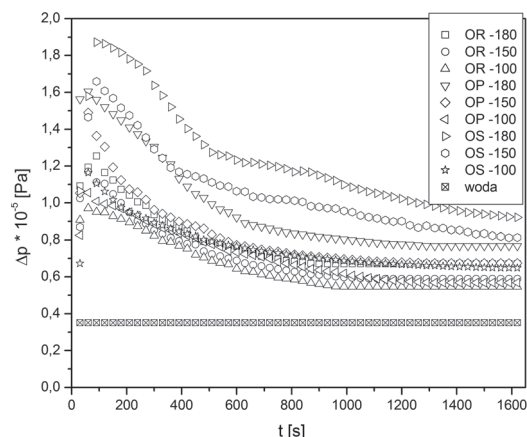
Tab. 1. Właściwości fizykochemiczne substancji oleistych

Substancja	Lepkość [Pa·s]	Gęstość [kg/m ³]
Olej roślinny Bartek (ZT Kruszwica S.A.)	0,065	886
Olej parafinowy FP (Alofarm, F.P.)	0,165	876
Olej silikonowy POLSIL OM300 (Z.CH. Silikony Polskie Sp. z o.o.)	0,300	910

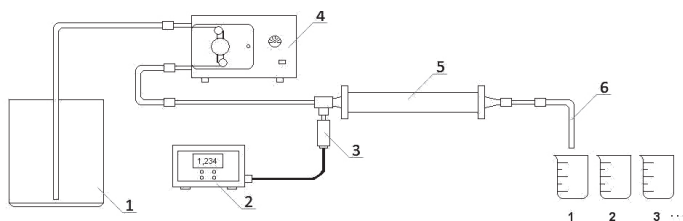
W celu ustalenia oporów jakie stawało płynącej cieczy, samo, czyste złożo, przed przeprowadzeniem pomiarów właściwych, zostały przeprowadzone kilkakrotne pomiary przepływu wody przez niezaolejone złożo, przy różnych prędkościach przepływu. Następnie dokonano właściwych pomiarów przepływu cieczy myjącej przy różnych początkowych zawartościach substancji olejowej, dla danej prędkości i różnych olejów.

Wyniki badań

Przepuszczalność zaolejonego złoża zależy przede wszystkim od rodzaju oraz od ilości substancji olejowej, która się w nim znajduje. W trakcie przepływu przez złożo cieczy myjącej, część zanieczyszczeń zostaje porwana i ilość substancji wysokolepkiej maleje, a przepuszczalność złoża wzrasta. Na podstawie przeprowadzonych badań możliwe było określenie zależności nadciśnienia jakie stawało zaolejone złożo od czasu w czasie trwania procesu przemywania go cieczą myjącą dla różnych początkowych ilości substancji olejowych o różnej lepkości i gęstości. Wypłukiwanie oleju prowadzono aż do osiągnięcia stanu ustalonego. Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 2.



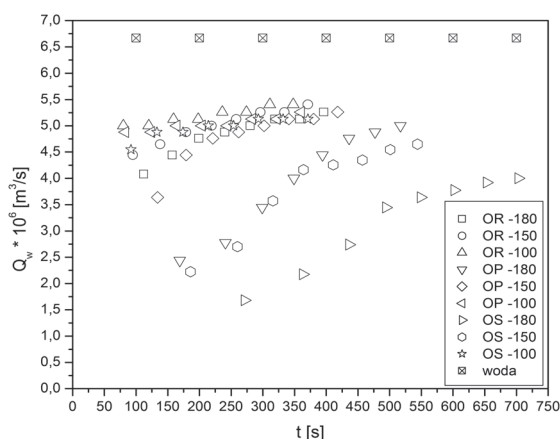
Rys. 2. Wykres zależności zmian ciśnienia od czasu przemywania dla różnych olejów (OR, OP, OS) przy różnych początkowych nasyceniach złoża olejem (180, 150, 100 ml)



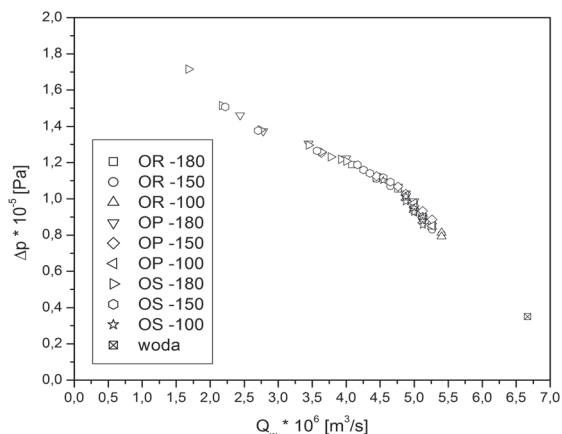
Rys. 1. Schemat aparatury badawczej

Podobnie w wyniku odblokowywania porów w złoże, zmianie ulegało natężenie wypływu cieczy z kolumny. Wykres zależności zmian natężenia wypływu Q_w w czasie trwania procesu wymywania t dla różnych olejów i różnych początkowych nasąceń został przestawiony na rys. 3. Na rys. 2 i 3 oraz następnych punkty oznaczone jako woda dotyczą przepływu przez złoże, które nie zostało wstępnie nasycone substancją wysokolepką.

Na podstawie danych eksperymentalnych przedstawionych na rys. 2 i 3 możliwe było ustalenie wartości nadciśnienia na wlocie do złoże Δp i odpowiadającej mu wartości natężenia wypływu Q_w w danej chwili czasu trwania procesu elucji, co zostało przedstawione na rys. 4.



Rys. 3. Wykres zależności natężenia wypływu cieczy Q_w w funkcji czasu trwania procesu dla różnych olejów (OR, OP, OS) przy różnych początkowych nasyceniach złoże olejem



Rys. 4. Wykres zależności zmian ciśnienia wywołanego przez złoże od natężenia wypływu dla różnych olejów (OR, OP, OS) przy różnych początkowych nasyceniach złoże olejem

W celu opisu procesu wymywania zastosowano teorię *Kozeny'ego – Carmana* [Carman, 1937; Kembłowski i in., 1985]. Zgodnie z tą teorią złoże ziarniste może być traktowane jako wiązka krętych kapilar z przepływającym przez nie płynem. Przepływ ma charakter laminarny oraz odbywa się w warunkach izotermicznych. Wartość spadku ciśnienia Δp w złoże ziarnistym można wyrazić za pomocą zależności:

$$\Delta p = f_{BK} \frac{l}{d_p} \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} v_o^2 \rho \quad (1)$$

gdzie: l – długość złoże [m], d_p – średnica ziarna w złoże [m], ϵ – porowatość [-], v_o – prędkość cieczy liczona na pusty aparat [$m \cdot s^{-1}$], ρ – gęstość cieczy [$kg \cdot m^{-3}$], f_{BK} – parametr równania.

Parametr f_{BK} jest zmodyfikowanym współczynnikiem tarcia możliwym do wyznaczenia za pomocą wzoru *Blake'a-Kozeny'ego-Carmana*:

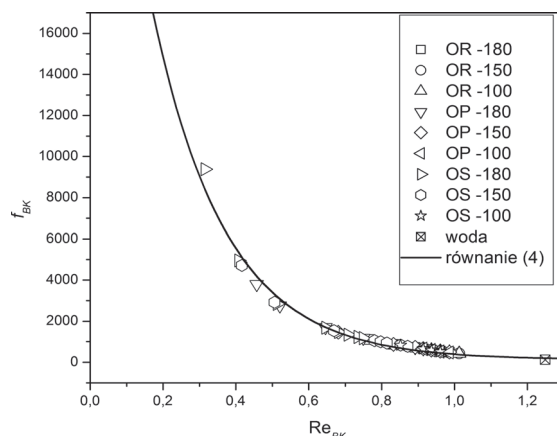
$$f_{BK} = \frac{A_{BK}}{Re_{BK}} \quad (2)$$

gdzie A_{BK} jest stałą, natomiast Re_{BK} jest zmodyfikowaną postacią liczby *Reynoldsa*:

$$Re_{BK} = \frac{v_o d_p \rho}{\eta(1-\epsilon)} \quad (3)$$

gdzie: η – lepkość cieczy [Pas].

Podstawiając wartości nadciśnienia Δp zmierzone podczas badań i obliczając prędkość v_o na podstawie natężenia wypływu Q_w oraz podstawiając właściwości fizykochemiczne dla wody ($\eta = 0,001$ Pas, $\rho = 1000$ kg/m^3), a także wartość porowatości złoże niezaolejonego możliwe było obliczenie wartości parametru f_{BK} oraz liczby *Reynoldsa* Re_{BK} za pomocą wzorów (1) i (3) dla każdego punktu pomiarowego. Zależność parametru f_{BK} od liczby zmodyfikowanej *Reynoldsa* przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Wykres zależności współczynnika tarcia f_{BK} względem liczby *Reynoldsa* Re_{BK} dla różnych olejów (OR, OP, OS) przy różnych początkowych nasyceniach złoże olejem

Z literatury przedmiotu [Kembłowski i in., 1985] wynika, że dla przepływu jednofazowego przez złoże ziarniste wartość parametru A_{BK} jest stała i wynosi 150. W przypadku prezentowanych danych dla przepływu wody przez czyste złoże o określonej porowatości ($\epsilon = 0,32$) wartość współczynnika A_{BK} wynosi 152, co oznacza, że eksperyment potwierdza dane literaturowe. Jednak w przypadku przepływu wody przez zaolejone złoże, wartości współczynnika A_{BK} są znacznie wyższe i ulegają zmianie w trakcie trwania procesu. W celu opisu danych przedstawionych na rys. 5 zastosowano zależność w postaci:

$$f_{BK} = f_{BK0} = A \exp(-B Re_{BK}) \quad (4)$$

Wielkość f_{BK0} jest zmodyfikowanym współczynnikiem tarcia dla oporów przepływu samej wody obliczonym za pomocą przekształconego wzoru (1); jego wartość wyniosła 121,8. Natomiast A i B są to parametry wynoszące odpowiednio 40000 i 5. Znając natężenie wypływu cieczy ze złoże Q_w i parametry złoże, można obliczyć ze wzoru (3) wartość zmodyfikowanej liczby *Reynoldsa*. Korzystając z równania (4) możliwe jest określenie parametru f_{BK} , a następnie stosując wzór (1) obliczyć można nadciśnienie Δp jakie będzie występować na wlocie do złoże. Ze względu na uniwersalność krzywej (4) można ją opisywać proces elucji substancji olejstych o dowolnych lepkościach, niezależnie od stopnia wycięcia ich ze złoże, co daje możliwość praktycznego zastosowania.

LITERATURA

- Carman P.C., 1937. Fluid flow through granular beds, *Trans. Inst. Chem. Engrs.* 15, 150-158
- Gworek B. 2004. *Technologia rekultywacji gleb*. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa
- Hewitt G.F., 1996. In search of two-phase flow, *Journal of Heat Transfer*, 118, 3, 518-527. DOI: 10.1115/1.2822662
- Khan F.I., Husain H., Hejazi R. 2004. An overview and analysis of site remediation technologies., *J. Environ. Manage.*, 71, 95-122. DOI: 10.1016/j.jenvman.2004.02.003
- Kembłowski Z., Michałowski S., Strumiłło C., Zarzycki R., 1985. *Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej*, WNT, Warszawa.
- Mohanty K.K., Hirasaki G.J., 2001. Transport in porous materials, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 6, 189-190. DOI: 10.1016/S1359-0294(01)00098-X