

JERZY SKŁADZIEN
JANUSZ SZYMKÓW

Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław

Identyfikacja rozkładu wielkości porów w osadzie filtracyjnym

Wprowadzenie

Proces filtracji zawieszin ciał stałych w płynach prowadzi do powstawania osadów filtracyjnych, które są złożonymi strukturami trójfazowymi składającymi się z cząstek ciała stałego oraz fazy ciekłej i gazowej wypełniającej przestrzeń międzyziarnowe. Wielkość cząstek, ich kształt oraz struktura upakowania osadów filtracyjnych odgrywają istotną rolę w procesach rozdzielania zawieszin, odwadniania i suszenia. Celem prac badawczych i konstrukcyjnych jest obniżenie wilgotności końcowej uzyskiwanych osadów filtracyjnych. Na każdym etapie odwadniania, stopień nasycenia osadu filtracyjnego cieczą zależy od wielkości porów. Matematyczne modelowanie czasu odwadniania, końcowego nasycenia cieczą i wytrzymałości wilgotnego osadu uzależnione jest od znajomości rozkładu wielkości porów wewnątrz placka filtracyjnego.

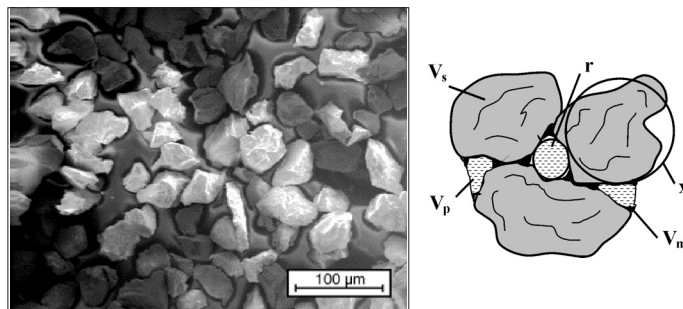
Istnieje szereg eksperymentalnych metod wyznaczania rozkładów wielkości porów w strukturach porowatych np. porozymetria rtęciowa, metody sorpcyjne. Wymagają one jednak sztywności i trwałości struktury materiału porowatego. Luźne materiały ziarniste, tworzące nietrwałe osady filtracyjne nie spełniają tego warunku. Dlatego prowadzone są prace badawcze mające na celu opracowanie metod identyfikacji rozkładu wielkości porów w nietrwałych strukturach porowatych na podstawie wyznaczania wielkości pośrednich, które są zależne od struktury porów. W ramach pracy opracowano i testowano metodę wyznaczania rozkładu wielkości porów opartą na znajomości rozkładu wielkości cząstek i przebiegu krzywej ciśnienia kapilarnego.

Struktura wewnętrzna placka filtracyjnego

W celu identyfikacji rozkładu wielkości porów w placku filtracyjnym konieczne jest przyjęcie założeń dotyczących modelu struktury wewnętrznej tych osadów. W przypadku modelowania kinematyki przepływów dwufazowych w osadzie przydatne są modele kapilarne [1]. W niniejszej pracy przedstawiono natomiast model statyczny struktury placka filtracyjnego oparty na następujących założeniach (Rys. 1):

- nieregularne cząstki ciała stałego reprezentowane są przez kule o zmierzonych średnicach zastępczych,
- wolne przestrzenie międzyziarnowe – pory przepływowe, reprezentowane są przez kule o średnicach podlegających identyfikacji,
- w osadzie istnieją strefy martwe niedostępne dla przepływu cieczy,
- każdej cząstce przypisana jest przestrzeń międzyziarnowa.

Podstawową wielkością charakteryzującą makrostrukturę placka filtracyjnego jest jego porowatość lub odpowiadający



Rys. 1. Wizualizacja struktury wewnętrznej materiału ziarnistego oraz założenia modelu

jej wskaźnik porowatości. Wielkości te zdefiniowane są następująco:

$$\varepsilon = \frac{V_p + V_m}{V_s + V_p + V_m} = \frac{e}{1 + e}; \quad e = \frac{V_p + V_m}{V_s} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (1)$$

gdzie:

- ε – porowatość,
- e – wskaźnik porowatości,
- x – wielkość cząstki ciała stałego, zmienna losowa, [m]
- r – wielkość pora, zmienna losowa, [m]
- $V_s = n_{cz} \int_{x_{min}}^{x_{max}} \frac{\pi x^3}{6} q_x(x) dx$ – objętość właściwa cząstek ciała stałego, [m³/kg c.s.]
- $V_p = n_{cz} \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{\pi r^3}{6} q_r(r) dr$ – objętość właściwa porów przepływowych osadu, [m³/kg c.s.]
- $V_m = \frac{S_m}{1 - S_m} V_p$ – objętość właściwa strefy martwej, [m³/kg c.s.]
- $n_{cz} = \frac{1}{\rho_s} \frac{1}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \frac{\pi x^3}{6} q(x) dx}$ – liczba cząstek ciała stałego, [1/kg c.s.]
- $q_x(x)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej x , [1/m]
- $q_r(r)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej r , [1/m]
- S_m – nasycenie cieczą w strefie martwej,
- α – współczynnik nierównomierności porów [2].

Krzywa ciśnienia kapilarnego

Końcowy stopień nasycenia cieczą osadu filtracyjnego podanego długotrwałemu odwadnianiu przez przedmuchiwanie powietrzem zależy od ciśnienia odwadniania P oraz od

własności fizykochemicznych filtratu; napięcia powierzchniowego γ i kąta zwilżania Θ . Ciecz zostaje usunięta ze wszystkich porów przepływowych większych od wartości wyznaczonej przez równanie *Laplace'a-Younga*:

$$rp(P) = \frac{4\gamma \cos \Theta}{P} \quad (2)$$

Ciecz pozostająca w placku filtracyjnym określa jego nasycenie zależne od zastosowanego ciśnienia odwadniania P . Zależność funkcyjna w postaci $S = f(P)$ nosi nazwę krzywej ciśnienia kapilarnego i można ją wyznaczyć doświadczalnie długotrwanie odwadniając placek filtracyjny na próżniowym filtrze laboratoryjnym przy zmiennych ciśnieniach.

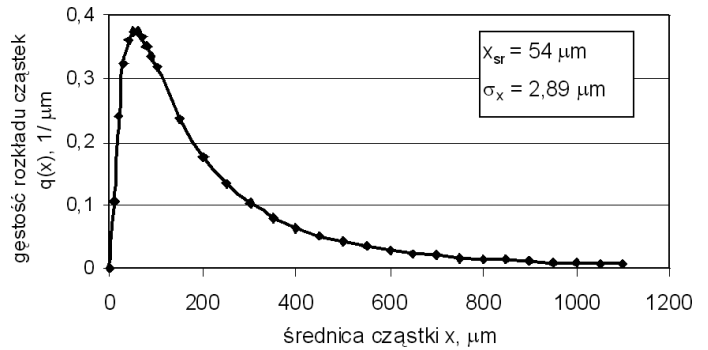
Zależność opisująca krzywą ciśnienia kapilarnego $S = f(P)$ można przedstawić w następującej postaci:

$$S(P) = \frac{\text{objętość filtratu pozostająca w porach}}{\text{objętość wszystkich porów}} = \int_{r_{\min}}^{rp(P)} \frac{\pi r^3}{6} q_r(r) dr + S_m \quad (3)$$

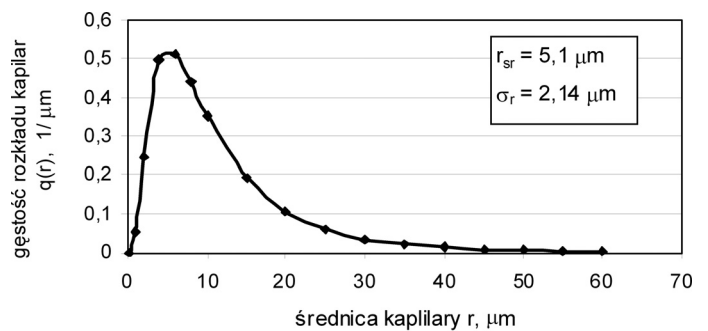
Identyfikacja rozkładu wielkości porów w osadzie filtracyjnym

Identyfikację rozkładu wielkości porów przeprowadzono dla placków filtracyjnych powstałych podczas filtracji ziemi okrzemkowej *Celite* i następnie odwadnianych przez przedmuchiwanie powietrzem na próżniowym filtrze laboratoryjnym. Doświadczenia przeprowadzono dla dwóch rodzajów filtratu; wody o napięciu powierzchniowym $\gamma = 0,0728$ N/m oraz izopropanolu o napięciu powierzchniowym $\gamma = 0,048$ N/m. Do celów identyfikacji otrzymano dwie krzywe ciśnienia kapilarnego (woda, izopropanol).

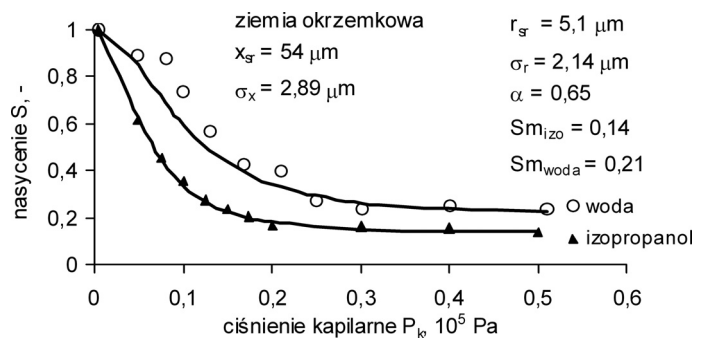
Analiza granulometryczna ziemi okrzemkowej *Celite* tworzącej osad filtracyjny, przeprowadzona na laserowym analizatorze *Malvern Mastersizer 2000* pozwoliła na wyznaczenie rozkładu wielkości cząstek. Dystrybuantę rozkładu ziarnowego przybliżono rozkładem logarytmiczno-normalnym o parametrach $\mu x = 3,992$ ($x_{sr} = 54 \mu\text{m}$) oraz $\sigma_x = 1,061$ ($\sigma_x = 2,89 \mu\text{m}$), (Rys. 2). Przyjęto, że wielkości porów mają również rozkład logarytmiczno-normalny [2]. Zatem identyfikacja rozkładu wielkości porów polegała na estymacji parametrów r_{sr} oraz σ_r rozkładu logarytmiczno-normalnego $q_r(r)$ dla każdej z eksperymentalnych krzywych ciśnienia kapilarnego przy wykorzystaniu równ. (3). Zidentyfikowany rozkład wielkości porów osadu filtracyjnego, który cechuje się następującymi parametrami $\mu r = 1,63$ ($r_{sr} = 5,1 \mu\text{m}$) oraz $\sigma_r = 0,76$ ($\sigma_r = 2,14 \mu\text{m}$) przedstawiono na rys. 3. Na rys. 4. przedstawiono dopasowanie eksperymentalnych i modelowych, równ. (3), krzywych ciśnienia kapilarnego, które stanowiło podsta-



Rys. 2. Zmierzona gęstość rozkładu wielkości cząstek dla ziemi okrzemkowej



Rys. 3. Zidentyfikowana gęstość rozkładu wielkości kapilar $r_{sr} = 5,1 \mu\text{m}$, $\sigma_r = 2,14 \mu\text{m}$



Rys. 4. Estymacja parametrów modelu na podstawie krzywych ciśnienia kapilarnego

wę do oszacowanie parametrów rozkładu wielkości porów placka filtracyjnego. Należy zwrócić uwagę na to, że przeciętna wielkość porów jest o rząd mniejsza od przeciętnej wielkości cząstek ciała stałego.

LITERATURA

1. J. Składzień, J. Szymków: Inż. Ap. Chem. 45, nr 4s, 13 (2006).
2. L.M. Arya, J.F. Paris: Soil Sci. Soc. Am. 45, 1023 (1981).