

JERZY SĘK
MAŁGORZTA TRYLUK
ARKADIUSZ KUCHARZEK

Wydział Inżynierii procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Badanie procesu nasiąkania struktur porowatych

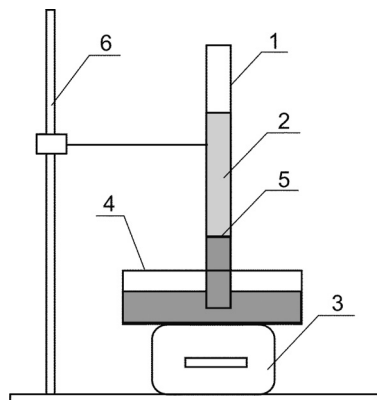
Wprowadzenie

Ciała o strukturze porowatej występują powszechnie, zarówno jako materiały pochodzenia naturalnego oraz jako materiały otrzymywane w wyniku procesów technologicznych. Do pierwszych z nich należy zaliczyć wszelkiego rodzaju skały, gleby i grunty oraz drewno. Do drugiej grupy należy ceramika budowlana – cegły, konstrukcje betonowe, spienione tworzywa sztuczne i inne. Bardzo dużą grupę stanowią również układy porowate o strukturze ziarnistej. Zawartość wilgoci w tych mediach decyduje o przebiegu procesów ich mielenia, przesiewania, granulacji czy też suszenia.

Bardzo często istotnym czynnikiem nie jest sama zawartość wilgoci w takich strukturach porowatych, ale przebieg i szybkość procesów nasiąkania. Decydują one bardzo często o właściwościach mechanicznych i użytkowych tego typu materiałów, a także o sposobie ich składowania czy też dystrybucji. Równaniem powszechnie używanym do przewidywania szybkości procesów nasiąkania jest zależność podana przez Washburna [1]. Ze względu jednak na ograniczony zakres stosowania tego modelu podjęto prace mające na celu zaproponowanie zależności, która pozwalałaby na przewidywanie przebiegu tych procesów z większą dokładnością.

Badania eksperymentalne

Schemat budowy stanowiska doświadczalnego do badania nasiąkania złoża cieczą zwilżającą przedstawiono na rys. 1. Jego głównym elementem była rurka szklana – 1 o średnicy 2,4 cm. Do rurki tej nasypywano wypełnienie o strukturze porowatej (piasek kwarcowy) – 2. Końcówka rurki zamknięta była przegrodą z siatki z tworzywa sztucznego, która umożliwiała penetrację cieczy, ale zapobiegała jednocześnie wysypowaniu się wypełnienia. Do wyznaczania zmian masy cieczy służyła waga elektroniczna – 3. Na szalce wagi znajdowało się naczynie z cieczą zwilżającą. W celu zmniejszenia błędów



Rys. 1. Schemat zestawu do pomiaru nasiąkania złoża cieczą zwilżającą: 1 – rurka szklana, 2 – wypełnienie, 3 – waga, 4 – naczynie z cieczą zwilżającą, 5 – poziom penetracji, 6 – statyw

pomiaru na skutek podwyższenia poziomu cieczy podczas zanurzenia rurki do cieczy oraz obniżenia się poziomu cieczy w naczyniu podczas penetracji cieczy zastosowano naczynie o dość dużej średnicy. Błąd związany z odparowaniem cieczy eliminowano przykrywając naczynie warstwą folii. Jako substancje penetrujące wykorzystano wodę i naftę.

Równania modelowe

Główną przyczyną powodującą wnikanie cieczy, a najczęściej wody do wnętrza struktur porowatych są siły napięcia powierzchniowego. Siły te, jeżeli powodują wchłanianie cieczy przez strukturę porowatą naszą również nazwę sił kapilarnych, których efekty działania są szczególnie istotne, jeżeli wewnątrz nasączanego materiału znajdują się kanaliki o małych średnicach nazywane zazwyczaj kapilarami. Proces ten został teoretycznie opisany za pomocą powszechnie znanego z literatury przedmiotu równania Washburna [1]. Model ten został wyprowadzony dla przypadku wznoszenia się cieczy w cylindrycznych kapilarach. Za jego pomocą można określić szybkość nasiąkania warstw ziarnistych na podstawie pomiarów zależności pomiędzy wysokością h , na jaką wzniosła się ciecz, a czasem t , w którym to nastąpiło. Model Washburna wyraża się zazwyczaj za pomocą równania o następującej postaci:

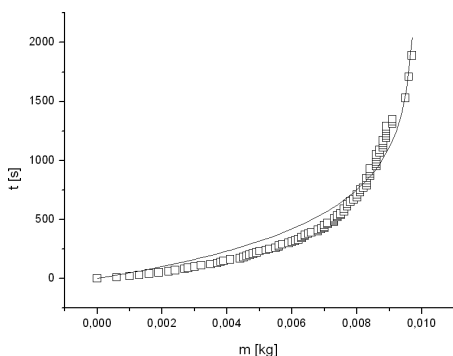
$$t = \frac{8\eta}{r^2 \rho g \sin \alpha} \left(m_{\infty} \ln \frac{m_{\infty}}{m_{\infty} - m} - m \right) \quad (1)$$

gdzie:

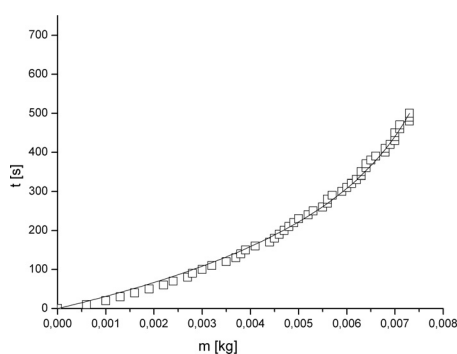
- t – czas trwania procesu,
- r – promień kapilary,
- η – lepkość cieczy,
- ρ – gęstość cieczy,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- m_{∞} – maksymalna masa pochłoniętej cieczy,
- m – masa cieczy pochłoniętej po czasie t .

Równanie Washburna, pomimo jego teoretycznej podbudowy, opartej na zjawiskach fizycznych nie opisuje z zadowalającą dokładnością całego przebiegu procesu nasiąkania złoża ziarnistych. W literaturze przedmiotu można znaleźć prace [2, 3] z których wynika, że równanie to bardzo dobrze opisuje nasiąkanie warstwy ziarnistej, jeżeli sam proces osiągnięcia maksymalnej wysokości jest rzędu kilkuset sekund. Jeżeli proces taki jest bardzo powolny i trwa kilka tysięcy sekund, to powszechnie obserwuje się duże różnice pomiędzy wynikami eksperymentalnymi, a uzyskiwanymi za pomocą modelu Washburna. Zjawiska tego, pomimo licznych prób nie udało się dotychczas wyjaśnić w sposób zadowalający.

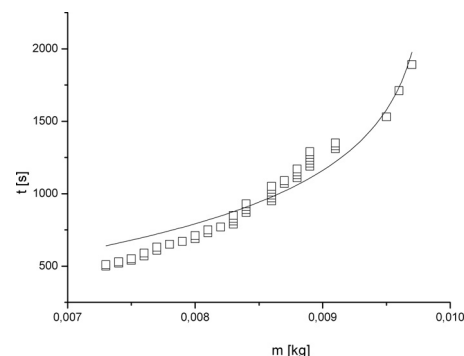
W ramach niniejszej pracy podjęto próbę opisu danych doświadczalnych za pomocą innych zależności matematycznych, które pozwoliłyby przewidywać proces nasiąkania z większą



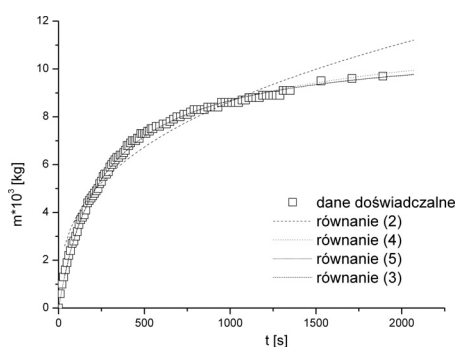
Rys. 2. Przybliżenie danych doświadczalnych w całym zakresie pomiarów za pomocą równania (1)



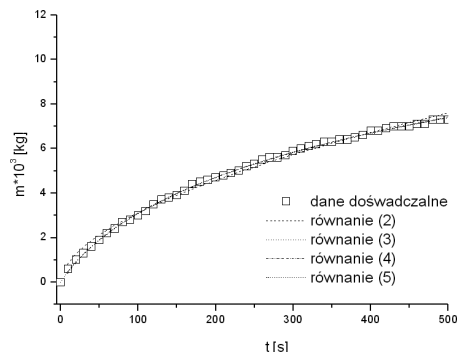
Rys. 3. Przybliżenie danych doświadczalnych w pierwszym okresie pomiarów za pomocą równania (1)



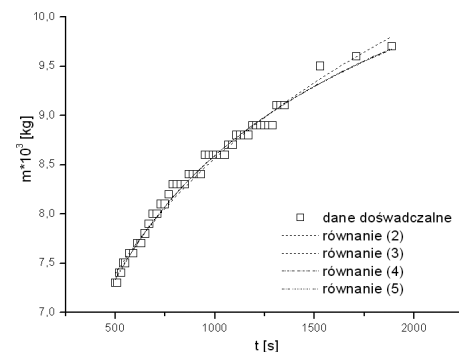
Rys. 4. Przybliżenie danych doświadczalnych w drugim okresie pomiarów za pomocą równania (1)



Rys. 5. Przybliżenie danych doświadczalnych w całym zakresie pomiarów za pomocą równań (2)–(5)



Rys. 6. Przybliżenie danych doświadczalnych w pierwszym okresie pomiarów za pomocą równań (2)–(5)



Rys. 7. Przybliżenie danych doświadczalnych w drugim okresie pomiarów za pomocą równań (2)–(5)

dokładnością. Do tego celu wykorzystano równania o następujących postaciach [4, 5]:

$$m = at^b \quad (2)$$

$$m = \frac{abt^{1-c}}{1 + bt^{1-c}} \quad (3)$$

$$m = at^{bt^{-c}} \quad (4)$$

$$m = \frac{t}{a + bt + c\sqrt{t}} \quad (5)$$

gdzie:

- m – masa pochłoniętej cieczy,
- t – czas,
- a, b, c – współczynniki wyznaczone metodą regresji krzywoliniowej za pomocą programu *Origin*.

Pierwsze z tych równań jest typową zależnością potęgową. Pozostałe trzy (3), (4) i (5) odpowiadają swoją formą matematyczną znanym z literatury przedmiotu równaniom *Langmuira*, *Freundlicha* i *Gunara*. Równania te wykorzystano do opisu danych doświadczalnych uzyskanych w czasie eksperymentów nasiąkania.

Omówienie wyników badań

Wyniki badań przedstawiono na wykresach dla przypadku, gdy płynem nasączającym była nafta. Z wykresów przedsta-

wionych na rys. 2–4 wynika, że zależność (1) pozwala opisywać dane doświadczalne w zasadzie tylko dla pierwszej części pomiarów, dla czasów krótszych niż 500 sekund. Próby opisu wyników dotyczących całego przebiegu procesu jak i jego drugiego etapu, dla czasów większych od kilkuset sekund, są obarczone istotnymi błędami. Na wykresach (Rys. 5–7) przedstawiono próby przybliżenia danych doświadczalnych za pomocą zależności (2)–(5). Z wykresów tych wynika, że największe różnice pomiędzy wartościami obliczonymi i doświadczalnymi występują w przypadku stosowania równania (2). Zależności (3)–(5) pozwalają na dokładny opis danych doświadczalnych zarówno w ciągu całego czasu trwania procesu nasiąkania, jak i w pierwszym i drugim etapie.

Z wykresów tych wynika, że największe różnice pomiędzy wartościami obliczonymi i doświadczalnymi występują w przypadku stosowania równania (2). Zależności od (3) do (5) pozwalają na dokładny opis danych doświadczalnych zarówno w ciągu całego czasu trwania procesu nasiąkania, jak i w pierwszym i drugim etapie.

LITERATURA

1. S.J. Kowalski: Inżynieria materiałów porowatych, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2004.
2. M. Lago, M. Arauj: *J. Coll. Interf. Sci.* 234, 35, (2001).
3. K.S. Sorbie, Y.Z. Wu, S.R. McDougall: *J. Coll. Interf. Sci.* 174, 289, (1995).
4. M. Tryluk: Praca dyplomowa, Politechnika Łódzka, 2007.
5. A. Kucharek: Praca dyplomowa, Politechnika Łódzka, 2009.