

Zbigniew Fąfara*, Włodzimierz Miska*

**PROGNOZOWANIE PRZEPUSZCZALNOŚCI ABSOLUTNEJ
GRUNTÓW NIESPOISTYCH
W ŚWIETLE BADAŃ LABORATORYJNYCH****

1. WPROWADZENIE

W trakcie budowy na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH stanowiska pomiarowego do badania migracji substancji ropopochodnych w fizycznych modelach gruntu określono w drodze bezpośrednich pomiarów laboratoryjnych szereg właściwości fizycznych wykorzystanych kruszyw [2–5], które to parametry z powodzeniem mogą być użyte do oceny pseudoprzepuszczalności w oparciu o ogólnie znane modele petrofizyczne [9]. Do właściwości tych należy przede wszystkim porowatość i skład granulometryczny [3–5]. Z drugiej strony eksperymentalne wartości współczynnika przepuszczalności dla luźnego i zagęszczonego ułożenia ziaren kruszyw zastosowanych do przygotowania modeli gruntu (wyznaczające dopuszczalny przedział zmienności) [5] oraz wyniki analizy porównawczej prędkości filtracji pionowej węglowodorów zmierzonej i estymowanej na podstawie prawa Darcy’ego [6] (umożliwiającej dopasowanie przybliżonej wartości współczynnika przepuszczalności) pozwalają na dokonanie analizy skuteczności prognozowania przepuszczalności dla tego konkretnego przypadku.

Zmierzona doświadczalnie przepuszczalność może być z powodzeniem uznana za absolutną z uwagi na sposób prowadzenia badań (próbki gruntu znajdowały się w stanie suchym a jako płynu roboczego użyto powietrza). Mimo obecności wilgoci w gruncie [2, 4, 5] filtracja węglowodorów może być w przybliżeniu traktowana jako przepływ jednofazowy (w interesującym zakresie głębokości zawilgocenie gruntu odniesione do objętości porów wynosiło poniżej 10%). Z powyższych względów uzyskiwane wyniki można określić jako wartości pseudoprzepuszczalności absolutnej gruntów. Stanowisko pomiarowe, którego dotyczą rozważania, spełnia kryteria podobieństwa [1].

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca zrealizowana w ramach badań własnych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH

2. POMIARY PRZEPUSZCZALNOŚCI ABSOLUTNEJ

Pomiary przepuszczalności absolutnej materiałów wykorzystanych do przygotowania poszczególnych modeli gruntu zrealizowano na stanowisku laboratoryjnym do badania przepuszczalności dla powietrza na WWiG AGH. Z każdego modelu gruntu pobrano dwie próbki, z których przygotowano dwa niezależne modele złoża w kształcie walca o długości 1590 mm i średnicy 45,9 mm każdy. Dla każdego modelu złoża wykonano niezależnie badania dla kruszywa przed zagęszczeniem (luźno usypanego) i po zagęszczeniu (stopień zagęszczenia wynosił 20÷30%). W ten sposób określono minimalną i maksymalną wartość współczynnika przepuszczalności. Badanie pojedynczej próbki obejmowało 15 niezależnych pomiarów dla różnych gradientów ciśnienia. W sumie dla pojedynczego modelu gruntu wykonano 30 pomiarów przepuszczalności dla próbek przed zagęszczeniem i 30 po zagęszczeniu (razem 180 pomiarów). Uzyskane wyniki uśredniano wieloetapowo [5]. Każdą populację 30 wyników eksperymentalnych (dotyczącą danego modelu gruntu i stopnia zagęszczenia) poddano analizie statystycznej. W pierwszym kroku badano rozstęp korzystając ze standardowego testu Dixona [10] i odrzucono wartości odbiegające. Następnie dla pozostałych danych obliczono wartość średnią, odchylenie standardowe i określono 95% przedział ufności. Wyniki pomiarów pseudoprzepuszczalności absolutnej dla powietrza te zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1

Pseudoprzepuszczalność absolutna dla powietrza poszczególnych modeli gruntu

Lp.	Próbki w stanie	Pseudoprzepuszczalność absolutna K_p [m ²]		
		Model 1	Model 2	Model 3
1	luźnym (granice przedziału ufności)	$2,70 \cdot 10^{-10}$ (2,26÷3,14)·10 ⁻¹⁰	$3,28 \cdot 10^{-11}$ (2,86÷3,71)·10 ⁻¹¹	$2,05 \cdot 10^{-11}$ (1,69÷2,51)·10 ⁻¹¹
2	zagęszczonym (granice przedziału ufności)	$3,43 \cdot 10^{-11}$ (3,08÷3,77)·10 ⁻¹¹	$5,70 \cdot 10^{-12}$ (5,44÷5,98)·10 ⁻¹²	$5,290 \cdot 10^{-12}$ (5,01÷5,57)·10 ⁻¹²

Na podstawie uzyskanych wartości współczynnika przepuszczalności można założyć (również w oparciu określony wcześniej skład granulometryczny [3, 5]), że na przygotowanym stanowisku pomiarowym model gruntu 1 odpowiada typowym gruntom piaszczystym, natomiast modele gruntu 2 i 3 typowym gruntom piaszczysto-gliniastym [7, 8].

3. ZASADY PROGNOZOWANIA PRZEPUSZCZALNOŚCI ABSOLUTNEJ

W rozważaniach wykorzystano następujące granularne i powierzchniowe modele petrofizyczne [9].

1) Model granularny Slichtera w postaci

$$K_p = A \frac{d}{a_p},$$

gdzie:

- A – współczynnik dopasowywany eksperymentalnie, przyjęto $A = 5 \cdot 10^3$,
- a_p – współczynnik uporządkowania, przyjęto $a_p = 0,97 \cdot n^{-3,3}$, gdzie n – porowatość,
- d – średnica ziaren sferycznych, przyjęto równą średnicy efektywnej $d = d_{ef}$.

2) Model granularny Therzagiego w postaci

$$K_p = A \frac{n^2 \cdot d^2}{\sqrt[3]{(1-n)^2}},$$

gdzie:

- d – średnica ziaren sferycznych, przyjęto równą średnicy efektywnej $d = d_{ef}$,
- A – współczynnik dopasowywany eksperymentalnie, przyjęto $A = 3 \cdot 10^{-3}$.

3) Model granularny Krumbeina i Monka w postaci

$$K_p = 760 \cdot d_g^2 \cdot \exp(-1,3 \cdot S_d),$$

gdzie:

- d_g – średnia geometryczna średnicy ziaren,
- S_d – odchylenie standardowe średnicy ziaren.

4) Model granularny Berga w postaci

$$K_p = 5,1 \cdot 10^4 \cdot n^{5,1} \cdot d_g^2 \cdot \exp(-1,385 \cdot p),$$

gdzie:

- d – parametr granulometryczny równy, $p = d_{90} - d_{10}$,
- d_{50}, d_{10}, d_{90} – n -procentowe średnice ziaren [7].

5) Model powierzchniowy Kozeny w postaci

$$K_p = \frac{n^3}{5 \cdot S_o^2},$$

gdzie S_o – klasyczna powierzchnia właściwa.

6) Model powierzchniowy Kozeny zmodyfikowany w postaci

$$K_p = \frac{1}{7,35} \frac{n^{2,76} \cdot (1-n)}{S_o^2}.$$

7) Model powierzchniowy Chilingariana, Maina i Sinokrata w postaci

$$K_p = \frac{4,46 \cdot 10^{10} \cdot (1-n)^2}{P_p^{2,2} \cdot S_o^2 \cdot \sqrt{n}},$$

gdzie P_p – parametr porowatości (przyjęto $P_p = \frac{1}{n^{2,15}}$).

W modelach powierzchniowych przyjęto relację między powierzchnią właściwą klasyczną i powierzchnią właściwą odniesioną do objętości szkieletu mineralnego postaci

Obliczenia modelowe zrealizowano wykorzystując wartości parametrów zamieszczonych w tabeli 2 [3, 5], które uzyskano w wyniku bezpośrednich pomiarów laboratoryjnych (porowatość) lub określono w oparciu o uzyskane laboratoryjnie krzywe składu ziarnowego przygotowanych modeli gruntu. Dokładność oceny parametrów (świadomie niepodana w tabeli 2 z uwagi na ograniczone ramy artykułu) ustalono wykorzystując pięciokrotnie powtórzone dla każdego modelu gruntu badanie składu granulometrycznego. Następnie uzyskane wyniki uśredniono.

Tabela 2
Oceny parametrów wykorzystanych w obliczeniach modelowych

Lp.	Parametr	Model 1	Model 2	Model 3
1	d_{10} [mm]	0,130	0,051	0,035
2	Mediana d_{50} [mm]	0,434	0,293	0,105
3	d_{60} [mm]	0,509	0,404	0,178
4	d_{90} [mm]	1,16	1,04	0,720
5	Wskaźnik jednorodności uziarnienia $U = d_{60}/d_{10}$	3,93	8,00	5,13
6	Średnica efektywna d_{ef} [mm]	0,37	0,18	0,10
7	Średnia geometryczna średnica ziaren d_g [mm]	0,541	0,335	0,184
8	Odchylenie standardowe średnicy ziaren S_d [mm]	0,825	0,809	0,606
9	Porowatość n [%]	38,2	39,6	35,2
10	Powierzchnia właściwa S_0 [m ² /m ³]	10020	20140	38890

4. OCENA WYNIKÓW OBLICZEŃ

Wyniki obliczeń przepuszczalności absolutnej zestawiono w tabeli 3. Współczynnik A w modelu Schlichtera i Therzagiego dobrano tak, by dla modelu gruntu 1 otrzymać wartość przepuszczalności zbliżoną do $80 D$ ($1 D = 0,987 \times 10^{-12} \text{ m}^2$), którą otrzymano podczas analizy porównawczej prędkości filtracji substancji ropopochodnej z bezpośrednich pomiarów laboratoryjnych i badań modelowych z wykorzystaniem prawa Darcy'ego [6].

Tabela 3
Ocena współczynnika przepuszczalności absolutnej przygotowanych modeli gruntu

Lp.	Model petrofizyczny	Przepuszczalność absolutna K_p [m^2]		
		Model 1	Model 2	Model 3
1	Model Slichtera	$7,96 \cdot 10^{-11}$	$4,36 \cdot 10^{-11}$	$1,64 \cdot 10^{-11}$
2	Model Therzagiego	$8,26 \cdot 10^{-11}$	$2,13 \cdot 10^{-11}$	$5,96 \cdot 10^{-12}$
3	Model Krumbeina i Monka	$7,61 \cdot 10^{-11}$	$2,98 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-11}$
4	Model Berga	$7,07 \cdot 10^{-11}$	$3,88 \cdot 10^{-11}$	$2,71 \cdot 10^{-12}$
5	Model Kozeny	$1,11 \cdot 10^{-10}$	$3,06 \cdot 10^{-11}$	$5,76 \cdot 10^{-12}$
6	Model Kozeny zmodyfikowany	$8,87 \cdot 10^{-11}$	$1,57 \cdot 10^{-11}$	$3,26 \cdot 10^{-12}$
7	Model Chilingariana, Maina i Sinokrata	$2,89 \cdot 10^{-10}$	$7,96 \cdot 10^{-11}$	$1,49 \cdot 10^{-11}$

Model powierzchniowy Chilingariana, Maina i Sinokrata dostarcza stosunkowo wysokich ocen pseudoprzepuszczalności. W przypadku modelu gruntu 1 wartość ta ($289 D$) mieści się w przedziale ufności górnej granicy zmienności ($270 D$) wyznaczonej przez eksperyment, natomiast dla modelu gruntu 2 ocena ($80 D$) dwa i pół razy przekracza górną granicę ($33 D$). Jedynie w modelu gruntu 3 ocena wynosząca $15 D$ lokuje się pomiędzy laboratoryjnymi wartościami granicznymi. W postaci modelu Chilingariana występuje parametr porowatości, który po przeliczeniu na porowatość daje sumarycznie w liczniku n do potęgi $4,23$ kompensowane kwadratem różnicy $(1-n)$. W modelu tym może pojawiać się nadmierna czułość na duże wartości porowatości, jakie cechują badane grunty.

W klasycznym modelu powierzchniowym Kozeny porowatość występuje w liczniku w trzeciej potęgze. Uzyskane oceny pseudoprzepuszczalności w przypadku każdego modelu gruntu mieszczą się pomiędzy zmierzoną wartością minimalną i maksymalną. Dla modelu gruntu 1 i 2 otrzymano odpowiednio wartości przepuszczalności równe $111 D$ i $31 D$, które są nieco wyższe od wartości otrzymanych w czasie analizy porównawczej prędkości filtracji [6] wynoszących $80 D$ i $12 D$. Dla modelu gruntu 3 uzyskano teraz ocenę przepuszczalności $6 D$ (przy badaniu prędkości filtracji $8 D$). Generalnie można jednak stwierdzić, że model Kozeny może być z powodzeniem wykorzystany do szacowania przepuszczalności gruntów.

W postaci zmodyfikowanego modelu powierzchniowego Kozeny w liczniku występuje porowatość w potęgze 2,76 kompensowana dodatkowo pierwszą potęgą różnicy $(1-n)$. Uzyskane w ten sposób oceny pseudoprzepuszczalności dla modelu gruntu 1 (59 D) i modelu gruntu 3 (3 D) wydają się zaniżone (w tym ostatnim przypadku ocena jest nawet mniejsza od minimalnej wartości eksperymentalnej). Jedyne dla modelu gruntu 2 otrzymano przepuszczalność równą 16 D. Najprawdopodobniej model ten posiada ograniczoną przydatność do oceny pseudoprzepuszczalności ośrodków gruntowych o dużej porowatości, ponieważ uzyskiwane wyniki w zbyt małym stopniu zależą od jej wartości, co w konsekwencji prowadzi do zaniżania ocen. Wyższej trafności prognoz można się spodziewać dla skał o porowatości nieprzekraczającej kilkunastu procent.

Model granularny Schlichtera został dopasowany (poprzez wartość stałej A) do pseudoprzepuszczalności równej 80 D dla modelu gruntu 1, ale mimo to zawyża on oceny dla pozostałych dwóch przypadków. W odniesieniu do modelu gruntu 2 uzyskana tą drogą wartość (44 D) o 30% przekracza górną granicę wyznaczoną przez eksperyment (33 D), natomiast w modelu gruntu 3 prognoza wynosząca 16 D jest bliska górnej granicy 21 D. Poza tym uzyskane wartości przepuszczalności niewiele się od siebie różnią, jak na te warunki (wartość największa dla modelu gruntu 1 jest tylko pięć razy większa od wartości najmniejszej uzyskanej dla modelu gruntu 3). W postaci modelu występuje w liczniku porowatość w potęgze 3,3 oraz średnica efektywna ziaren w pierwszej potęgze. Modele powierzchniowe zawierają zazwyczaj w mianowniku drugą potęgę powierzchni właściwej, która generalnie dla utworów luźnych jest odwrotnie proporcjonalna do średnicy ziaren.

W postaci modelu Therzagiego ocena pseudoprzepuszczalności zależy od kwadratu porowatości kompensowanego w mianowniku sześciennym pierwiastkiem z kwadratu wyrażenia $(1-n)$, czyli efektywnie zależy od porowatości w potęgze 2,67, oraz kwadratu efektywnej średnicy ziaren. Uzyskane oceny przepuszczalności (po dopasowaniu stałej A dla modelu gruntu 1) mieszczą się w granicach wyznaczonych przez pomiar laboratoryjny. Dla modelu gruntu 2 uzyskano wartość 21 D (nieco wyższą, niż pojawiła się podczas analizy porównawczej prędkości filtracji [6] – 12 D), natomiast dla modelu gruntu 3 wartość 6 D (tym razem niższą od tamtej oceny – 8 D). Generalnie jednak model Therzagiego może być użyty do predykcji współczynnika przepuszczalności gruntów w tym przypadku.

Model Krumbeina–Monka w odróżnieniu od dwóch poprzednio omówionych modeli granularnych wyraża pseudoprzepuszczalność za pomocą średniej geometrycznej średnicy ziaren (zamiast średnicy efektywnej) oraz odchylenia standardowego średnicy ziaren. Ze statystycznego punktu widzenia średnia geometryczna jest inną charakterystyką rozkładu ziarnowego, w porównaniu ze średnicą efektywną, jednak ta ostatnia cechuje się powiązaniem ze zjawiskami fizycznymi, które kształtują obraz filtracji płynów przez ośrodki porowate (wartość średnicy efektywnej jest tak dobierana, by powierzchnia właściwa gruntu fikcyjnego złożonego z ziaren o tej średnicy była równa wartości oczekiwanej powierzchni właściwej rzeczywistego gruntu, wyliczanej w oparciu o znany skład granulometryczny tego gruntu). Na tej podstawie można wnioskować o przewadze np. modelu Therzagiego nad modelami biorącymi pod uwagę obraz czysto statystyczny. Z drugiej strony model Krumbeina–Monka uwzględnia dodatkowo odchylenie standardowe, które jest miarą jednorodności rozkładu ziaren. Prognozy współczynnika przepuszczalności uzyskane w tym przypadku mieszczą się w granicach przedziału zmienności wytyczonego przez eksperyment, chociaż wydają się nieco za wysokie.

Podobne do poprzedniego przypadku model granularny Berga wiąże ocenę współczynnika pseudoprzepuszczalności ze statystycznym rozkładem ziaren, wykorzystując tylko nieco inne charakterystyki opisowe. Zamiast średniej geometrycznej bierze pod uwagę medianę, zamiast odchylenia standardowego inny parametr wysortowania ziaren. Ponadto do modelu wchodzi porowatość w piątej potędze. Oceny przepuszczalności dla modelu gruntu 1 (71 D) i modelu gruntu 3 (2,7 D) wydają się za niskie. W przypadku modelu gruntu 2 sytuacja jest odwrotna, otrzymana przepuszczalność 39 D wykracza poza górną granicę nakreśloną przez eksperyment (33 D).

5. PODSUMOWANIE

W czasie badań wykorzystano wyniki bezpośrednich pomiarów laboratoryjnych porowatości oraz składu granulometrycznego trzech fizycznych modeli gruntu do oceny współczynnika przepuszczalności absolutnej w oparciu o siedem ogólnie znanych modeli petrofizycznych.

Uzyskane prognozy porównano następnie z wynikami eksperymentu. W odniesieniu do modeli granularnych stwierdzono:

1. Większą trafność prognoz modeli wykorzystujących wprost proporcjonalną zależność przepuszczalności od kwadratu reprezentatywnej średnicy ziaren.
2. Mniejszą dokładność prognozowania przepuszczalności przez modele wykorzystujące statystyczne charakterystyki rozkładu ziaren (model Krumbeina–Monka, Berga).
3. Większą dokładność prognozowania przepuszczalności przez modele wykorzystujące średnicę efektywną, powiązaną z wielkością sił powierzchniowych działających w gruncie na filtrujące płyny (model Therzagiego).

W odniesieniu do modeli powierzchniowych stwierdzono:

1. Modele wyrażające wprost proporcjonalną zależność przepuszczalności od większej niż czwarta potęgi porowatości, dla gruntów wydają się zawyżać ocenę przepuszczalności (model Chilingariana).
2. Modele wyrażające wprost proporcjonalną zależność przepuszczalności od mniejszej niż trzecia potęgi porowatości dla gruntów wydają się zaniżać ocenę przepuszczalności (zmodyfikowany model Kozeny).
3. W przypadku gruntów największą trafnością ocen cechują się modele wyrażające wprost proporcjonalną zależność przepuszczalności od trzeciej potęgi porowatości (model Kozeny).

LITERATURA

- [1] Fąfara Z.: *Wykorzystanie analizy podobieństwa do projektowania laboratoryjnego stanowiska pomiarowego do badania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ropopochodnych w gruncie*. Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria, z. 4/2, 2004
- [2] Fąfara Z., Rychlicki S.: *Influence of soil parameters on depth of oil waste penetration*. Acta Montanistica Slovaca, Koszyce, t. 9, vol. 3, 2004, 172–175

- [3] Fąfara Z., Miska W.: *Rozpraszanie zanieczyszczeń ropopochodnych w gruncie w świetle badań laboratoryjnych*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 22/1, 2005, 127–134
- [4] Fąfara Z., Rychlicki S.: *Wpływ właściwości gruntu na migrację węglowodorów na podstawie badań laboratoryjnych*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 22/1, 2005, 135–143
- [5] Rychlicki S. (red.): *Adaptacja metod górnictwa naftowego do usuwania zanieczyszczeń węglowodorowych ze środowiska gruntowo-wodnego*. Kraków, UWND 2006
- [6] Fąfara Z.: *Porównanie filtracji wybranych substancji ropopochodnych w fizycznym modelu gruntu*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 23/1, 2006
- [7] PN-98/B-02481: *Geotechnika – terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar*
- [8] PN-98/R-04033: *Gleby i utwory mineralne. Podział na frakcje i grupy granulometryczne*
- [9] Traple J., Twardowski K., Glazor A.: *Modele petrofizyczne skał zbiornikowych wykorzystywane w praktyce geologicznej*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 18/2, 2001, 457–467
- [10] Volk W.: *Statystyka stosowana dla inżynierów*. Warszawa, WNT 1973