

Zbigniew Fąfara\*

## PORÓWNANIE FILTRACJI WYBRANYCH SUBSTANCJI ROPOPOCHODNYCH W FIZYCZNYM MODELU GRUNTU\*\*

### 1. WPROWADZENIE

Na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH przygotowano laboratoryjne stanowisko pomiarowe do badania migracji zanieczyszczeń ropopochodnych w gruncie [3, 4, 7], które spełnia kryteria podobieństwa [1]. Stanowisko to obejmuje trzy niezależne fizyczne modele gruntów niespoistych, odpowiadające swoimi właściwościami typowym gruntom piaszczystym i piaszczysto-gliniastym [3, 7]. Na stanowisku tym zrealizowano badania filtracji pionowej trzech wybranych substancji ropopochodnych, w roli których użyto etyliny bezołowiowej 95-oktanowej (paliwo silników benzynowych), oleju napędowego zimowego (paliwo silników diesla) oraz ropy z Kopalni „Grobla” (koło Bochni). Wykorzystując metodę atmochemiczną, badano obecność par węglowodorów wybuchowych w gazach gruntowych gromadzących się w rurkach pomiarowych specjalnie zainstalowanych w każdym z modeli gruntu [3, 4, 7]. Na podstawie tych wyników oszacowano prędkość filtracji podłużnej substancji ropopochodnej [2, 5–7]. Wartości te porównano następnie z rezultatami obliczeń prędkości filtracji na podstawie prawa Darcy’ego. Jako parametry równania wykorzystano wartości tabelaryczne lub określone laboratoryjnie właściwości substancji ropopochodnych oraz zmierzone bezpośrednio przepuszczalności modeli gruntu.

### 2. POMIARY LABORATORYJNE PRĘDKOŚCI FILTRACJI

W każdym z modeli gruntu zainstalowano na różnych głębokościach (tab. 1) siedem poziomych perforowanych rurek pomiarowych [3, 4, 7]. Po rozlaniu ropopochodnej substancji zanieczyszczającej na powierzchni modelu migrowała ona w gruncie między innymi

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

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

w drodze filtracji pionowej w fazie ciekłej. Z uwagi na obecność wody w przestrzeni porowej miał miejsce przepływ dwufazowy. Wpływ wody uwidacznia się szczególnie od głębokości około 1 m, gdzie zawartość wilgoci dochodzi nawet do 30% [2, 4, 5]. W płyt-szych partiach zmienia się ona od kilku do kilkunastu procent.

**Tabela 1**  
Zmierzona prędkość filtracji pionowej substancji ropopochodnej w gruncie

Substancja		Etylina 95			Olej napędowy			Ropa z kopalni „Grobła”		
Model gruntu		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Interwał		prędkość			prędkość			prędkość		
$H_{st}$ [cm]	$H_{sp}$ [cm]	$v$ [mm/s]			$v$ [mm/s]			$v$ [mm/s]		
0	25	2,500	1,667	1,250	0,833	0,714	0,714	1,389	0,556	0,481
25	40	2,500	1,250	0,375	0,600	0,333	0,214	0,357	0,107	0,075
40	55	2,500	0,283	0,167	0,375	0,115	0,086	0,190	0,032	0,034
55	70	2,308	0,273	0,150	0,250	0,075	0,056	0,100	0,020	0,016
70	85	2,000	0,125	0,143	0,125	0,063	0,033	0,054	0,013	0,009
85	100	1,364	0,073	0,136	0,073	0,047	0,025	0,033	0,008	0,007
100	115	0,536	0,060	0,111	0,052	0,024	0,020	0,018	–	–
Prędkość średnia		2,269	0,227	0,153	0,250	0,084	0,058	0,115	0,022	0,020

Na podstawie rozważań teoretycznych [2, 4], stwierdzono że proces filtracji decyduje o zasięgu głębokościowym skażenia. W trakcie pomiarów rejestrowano moment dojścia filtrujących węglowodorów na określoną głębokość, co objawiało się wzrostem koncentracji par węglowodorów wybuchowych w gazach gruntowych gromadzących się w rurkach pomiarowych. Uzyskane relacje czasowe wykorzystano do oszacowania prędkości filtracji pionowej węglowodorów [3–7]. W tabeli 1 zamieszczono wartości tej prędkości wyliczone dla poszczególnych siedmiu odcinków pomiarowych (wynikających ze sposobu ułożenia rurek pomiarowych), dla każdego z trzech fizycznych modeli gruntu oraz każdej z trzech użytych substancji ropopochodnych. Podane wyniki dotyczą badań zrealizowanych w ciągu około dwóch lat, co było między innymi uwarunkowane koniecznością oczyszczenia stanowiska pomiarowego z pozostałości wcześniej użytych substancji zanieczyszczających. W każdym przypadku wraz ze wzrostem głębokości prędkość maleje, co najprawdopodobniej wynika z rosnącego zawilgocenia gruntu i w konsekwencji spadku jego pseudoprzepuszczalności.

Dla celów porównawczych w dalszej części pracy użyto prędkości filtracji substancji ropopochodnych obliczonych w przedziale głębokości 40÷85 cm (interwały 40÷55 cm, 55÷70 cm i 70÷85 cm). Dzięki temu uzyskano wartości przedziałowe dotyczące przesiąka-

nia zanieczyszczeń przy stosunkowo niedużym wpływie fazy wodnej. Dla dwóch najpłytszych interwałów (głębokość 0÷40 cm) szacowane prędkości filtracji zanieczyszczeń mogą być niedokładne na skutek wpływu procesu wylewania substancji ropopochodnej na powierzchni modelu gruntu (skończony i stosunkowo długi czas rozlewania, gromadzenie się zanieczyszczeń na powierzchni w postaci kałuży oraz występowanie niezerowej prędkości wypływu zanieczyszczeń z naczynia przy rozlewaniu). Dla dwóch najgłębszych interwałów (głębokość 85÷115 cm) bardziej znacząco na końcowe wyniki wpływa rosnąca zawartość wilgoci w gruncie [2, 4, 5]. Dodatkowo wraz z głębokością obniża się ilość masy filtrującej substancji ropopochodnej na skutek jej adsorpcji na fazie stałej, w efekcie czego najprawdopodobniej w dwóch przypadkach nie udało się określić prędkości filtracji dla interwału 100÷115 cm. W ostatnim wierszu tabeli 1 zamieszczono średnią arytmetyczną wartości prędkości filtracji z trzech interwałów z zakresu głębokości 40÷85 cm.

### 3. OCENA PRĘDKOŚCI FILTRACJI W OPARCIU O PRAWO DARCY'EGO

Do oceny prędkości filtracji zanieczyszczeń ropopochodnych wykorzystano standardową postać prawa filtracji Darcy'ego, z której wynika następująca zależność

$$v = K_f \cdot i = \frac{K_p}{\mu} \cdot \rho \cdot g \cdot i,$$

gdzie:

- $K_f$  – współczynnik filtracji modelu gruntu,
- $K_p$  – współczynnik pseudoprzepuszczalności absolutnej modelu gruntu,
- $i$  – spadek hydrauliczny,
- $\mu$  – współczynnik lepkości dynamicznej substancji ropopochodnej,
- $\rho$  – gęstość właściwa substancji ropopochodnej,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie (przyjęto  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).

W obliczeniach przyjęto standardowe tabelaryczne [8] lub określone w wyniku badań laboratoryjnych właściwości wykorzystanych substancji ropopochodnych (tab. 2) oraz dopasowaną wartość współczynnika przepuszczalności modeli gruntu, wybraną z uwzględnieniem przedziału zmienności wyznaczonego przez zmierzoną laboratoryjnie przepuszczalność dla luźno usypanego i zagęszczonego ośrodka porowatego (tab. 3). Dokonując wyboru dla danego modelu gruntu reprezentatywnej wartości współczynnika pseudoprzepuszczalności, starano się uzyskać możliwie jak największą zgodność obliczonej według prawa Darcy'ego prędkości filtracji dla poszczególnych substancji ropopochodnych z odpowiadającymi im wartościami zmierzonymi na stanowisku pomiarowym. Przedstawione w tabeli 3 przepuszczalności poszczególnych modeli gruntu, a także nieprezentowany w niniejszej pracy ich skład granulometryczny [4, 6, 7] pozwalają traktować model gruntu 1 jako przedstawiciela typowych gruntów piaszczystych, natomiast modele 2 i 3 jako typowe grunty piaszczysto-gliniaste. Wyniki obliczeń prędkości filtracji z wykorzystaniem prawa Darcy'ego zamieszczono w tabeli 4.

**Tabela 2**

Wybrane właściwości wykorzystanych substancji ropopochodnych

Parametr	Substancja ropopochodna		
	Etylina	Olej napędowy	Ropa z kopalni „Grobla”
$\mu$ [Pa×s]	$0,36 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	780	870	820

**Tabela 3**

Współczynniki pseudoprzepuszczalności absolutnej modeli gruntu

Model gruntu	Model 1	Model 2	Model 3
Zmierzona wartość minimalna $K_p$ [m <sup>2</sup> ]	$3,008 \cdot 10^{-10}$	$3,284 \cdot 10^{-11}$	$2,052 \cdot 10^{-11}$
Pseudoprzepuszczalność dopasowana $K_p$ [m <sup>2</sup> ]	$80 \cdot 10^{-12}$	$12 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-12}$
Zmierzona wartość maksymalna $K_p$ [m <sup>2</sup> ]	$2,964 \cdot 10^{-11}$	$5,704 \cdot 10^{-12}$	$5,290 \cdot 10^{-12}$

**Tabela 4**

Ocena prędkości filtracji substancji ropopochodnej z prawa Darcy’ego

Substancja ropopochodna	Etylina	Olej napędowy	Ropa z kopalni „Grobla”
Model gruntu	Prędkość filtracji $v$ [mm/s]		
1	1,700	0,478	0,214
2	0,255	0,072	0,032
3	0,170	0,048	0,021

#### 4. ANALIZA PORÓWNAWCZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Porównując zmierzone i obliczone prędkości filtracji pionowej badanych substancji ropopochodnych w poszczególnych modelach gruntu, można generalnie stwierdzić, że uzyskane wartości są podobne. W pięciu przypadkach na dziewięć prognozy mieszczą się w przedziałach wyznaczonych przez zmierzona prędkość filtracji w interwale 70÷85 cm (dolna granica) i w interwale 40÷55 cm (górna granica).

Dla etyliny w modelu 1 gruntu piaszczystego zmierzona prędkość filtracji pionowej w zakresie głębokości 40÷85 cm zmienia się w przedziale 2,0÷2,5 mm/s, natomiast z prawa Darcy’ego dostaje się wartość nieco niższą (1,7 mm/s). Fakt ten można wytłumaczyć wpływem dużej intensywności parowania etyliny (duża prężność par) i łatwością dyfuzji par w przestrzeni porowej o stosunkowo dużych przekrojach kanałów. Wykorzystywana metoda

atmogeochemiczna opiera się na wykrywaniu obecności par węglowodorów wybuchowych w gazach gruntowych, które w tym przypadku najprawdopodobniej znacząco poprzedzały filtrującą w kierunku pionowym etylinę w fazie ciekłej i dlatego zmierzone prędkości filtracji są wyższe od obliczonych. Dla modelu 2 i 3 gruntu piaszczysto-gliniastego przestrzeń porowa charakteryzuje się mniejszymi przekrojami i większą krętością, co utrudnia (spowalnia) dyfuzję par węglowodorów i różnice pomiędzy zmierzoną i obliczoną prędkością filtracji są znacznie mniejsze. W modelu gruntu 2 obliczona z prawa Darcy'ego wartość współczynnika filtracji 0,26 mm/s lokuje się w pobliżu górnej granicy eksperymentalnego przedziału zmienności 0,13÷0,28 mm/s, natomiast w modelu gruntu 3 obliczony współczynnik filtracji 0,17 mm/s prawie dokładnie odpowiada wartości górnej granicy przedziału zmienności danych laboratoryjnych 0,14÷0,17 mm/s.

Nieco inaczej wygląda porównanie wyników dotyczących filtracji oleju napędowego. Substancja ta cechuje się znacznie niższą prężnością par w porównaniu z etyliną. Badania wstępne pokazały, że ekwiwalentna koncentracja par węglowodorów wybuchowych w zbiorniku nad powierzchnią oleju wynosiła maksymalnie kilkadziesiąt setnych procenta objętości. Tak niskie wartości były nieadekwatne dla wykorzystywanej metody atmogeochemicznej, gdy tło w powietrzu utrzymywało się na poziomie setnych części % obj. Z uwagi na to zdecydowano się na dodanie do oleju napędowego niewielkiej ilości etyliny (ok. 5% obj.), która spełniać miała rolę znacznika. Osiągnięto w ten sposób rejestrowany poziom wskazań znacznie przewyższający tło w powietrzu, jednak uzyskiwane amplitudy sygnału były co najmniej dziesięć razy niższe, niż w wypadku etyliny. Prognozowany współczynnik filtracji oleju napędowego w modelu 1 gruntu piaszczystego wynosi 0,48 mm/s i jest znacznie wyższy od górnej granicy przedziału zmienności 0,13÷0,38 mm/s prędkości filtracji określonej laboratoryjnie. Może to wynikać z ograniczonej szybkości uwalniania się par węglowodorów wybuchowych z fazy ciekłej. Duża przepuszczalność modelu gruntu sprawia, że filtrujący pionowo w dół olej napędowy w rzeczywistości zdąży minąć punkt pomiarowy na danej głębokości, zanim z opóźnieniem w gazach gruntowych zgromadzi się wystarczająca ilość par węglowodorów wybuchowych (przyjęto minimalną koncentrację na poziomie trzykrotnie wyższym od tła w powietrzu). Dobre właściwości filtracyjne ośrodka porowatego są więc przyczyną przesunięcia (odwrotnie niż dla etyliny) w czasie i w przestrzeni obrazu skażenia widzianego z perspektywy fazy ciekłej zanieczyszczenia i jego (opóźnionej) fazy gazowej. W modelu 2 i 3 gruntu piaszczysto-gliniastego zjawisko to najprawdopodobniej nie powinno występować (w takiej skali) z uwagi na znacznie gorsze właściwości filtracyjne ośrodka porowatego. Obliczony współczynnik filtracji oleju napędowego w modelu gruntu 2 wynosi 0,07 mm/s i lokuje się w środku przedziału zmienności 0,06÷0,12 mm/s wyznaczonego przez eksperyment. W modelu gruntu 3 ocena współczynnika filtracji jest równa 0,05 mm/s i również znajduje się w środku przedziału zmienności laboratoryjnie obliczonej prędkości filtracji 0,03÷0,09 mm/s. W tych dwóch ostatnich przypadkach zgodność prognoz i eksperymentu jest bardzo dobra.

Ropa z kopalni „Grobla” cechowała się własną prężnością par węglowodorów wybuchowych wystarczającą z punktu widzenia wymagań wykorzystywanej metody atmogeochemicznej, dlatego nie było potrzeby stosowania dodatkowego znacznika. Rejestrowane w tym przypadku ekwiwalentne koncentracje par węglowodorów wybuchowych były

znacznie niższe niż dla etyliny, natomiast nieco wyższe w porównaniu z olejem napędowym. W rezultacie w modelu 1 gruntu piaszczystego zaobserwowano podobną jak w wypadku oleju napędowego tendencję, nieco wyższej prędkości filtracji pionowej obliczonej na podstawie prawa Darcy'ego (wartość 0,21 mm/s) w porównaniu z danymi doświadczalnymi, które dla interwału głębokości 40÷85 cm dają przedział zmienności 0,05÷0,19 mm/s. Tym razem jednak prognoza w znacznie mniejszym stopniu przewyższa górną granicę eksperymentalnej prędkości filtracji ropy z kopalni „Grobla”. Efekt ten z powodzeniem można tłumaczyć podobnie jak dla oleju napędowego, wyprzedzeniem w czasie węglowodorów w fazie gazowej przez zanieczyszczenia w fazie ciekłej. W modelu 2 i 3 gruntu piaszczysto-gliniastego o znacznie gorszych właściwościach filtracyjnych wspomniane przesunięcie powinno być dużo mniejsze i uzyskane prognozy współczynnika filtracji ropy odpowiadają górnej granicy eksperymentalnego przedziału zmienności. W modelu gruntu 2 obliczona prędkość filtracji jest równa 0,03 mm/s, natomiast przedział zmienności prędkości filtracji dla interwału głębokości 40÷85 cm wynosi 0,01÷0,03 mm/s. W modelu gruntu 3 prędkość filtracji oznaczona na podstawie prawa Darcy'ego jest równa 0,02 mm/s, natomiast eksperymentalny przedział zmienności jest prawie identyczny, chociaż znaleziona wartość dla odcinka pomiarowego 40÷55 cm (0,034 mm/s) wydaje się nieco zawyżona.

## 5. PODSUMOWANIE

Porównanie wyników badania prędkości filtracji pionowej wybranych substancji ropopochodnych w fizycznych modelach gruntu na przygotowanym stanowisku pomiarowym z jej oceną na podstawie prawa Darcy'ego pozwala na sformułowanie następujących wniosków.

1. W przypadku substancji ropopochodnej o dużej prężności par (jak etylina) migrującej w ośrodku gruntowym o bardzo dobrych właściwościach filtracyjnych można obserwować w rzeczywistości wyższe wartości prędkości filtracji pionowej (dla atmogeochemicznej metody pomiarowej), niż wynikałoby to z prawa Darcy'ego z powodu możliwego wyprzedzania filtrujących pionowo w dół węglowodorów w fazie ciekłej przez ich pary.
2. Wraz z pogarszaniem się właściwości filtracyjnych ośrodka porowatego proces dyfuzji wyprzedzającej par węglowodorów (a w konsekwencji ich parowanie) jest utrudniony, przez co zjawisko opisane w punkcie pierwszym ma niewielkie znaczenie i obserwuje się dużą zgodność wartości eksperymentalnych prędkości filtracji etyliny z ich oceną prognostyczną.
3. W przypadku substancji ropopochodnej o małej prężności par (jak olej napędowy) migrującej w ośrodku gruntowym o bardzo dobrych właściwościach filtracyjnych można obserwować w rzeczywistości niższe prędkości filtracji pionowej określane z wykorzystaniem metody atmogeochemicznej, niż wynika to z prawa Darcy'ego, z powodu wyraźnego wyprzedzenia par węglowodorów przez filtrujące pionowo w dół węglowodory w fazie ciekłej. Wniosek ten stanowi zarazem uwagę na temat ograniczonego zakresu zastosowań metody atmogeochemicznej w badaniach tego typu.

4. Wraz z pogarszaniem się właściwości filtracyjnych ośrodka porowatego proces filtracji wyprzedzającej węglowodorów w fazie ciekłej zostaje spowolniony, przez co zjawisko opisane w punkcie trzecim występuje w minimalnym stopniu i obserwuje się dużą zgodność wartości eksperymentalnych prędkości filtracji oleju napędowego z ich oceną prognostyczną.

## LITERATURA

- [1] Fałara 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] Fałara Z., Rychlicki S.: *Influence of soil parametres on depth of oil waste penetration*. Acta Montanistica Slovaca, Koszyce, t. 9, vol. 3, 2004, 172–175
- [3] Fałara Z., Miska W.: *Rozpraszanie zanieczyszczeń ropopochodnych w gruncie w świetle badań laboratoryjnych*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 22/1, 2005, 127–134
- [4] Fałara 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] Fałara Z., Rychlicki S.: *Wpływ wilgotności pierwotnej na prędkość migracji substancji ropopochodnej w środowisku gruntowo-wodnym*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1690, Górnictwo, z. 267, 2005, 77–82
- [6] Fałara Z.: *Laboratory research of vertical filtration of petroleum hydrocarbon contaminants in soil*. Ostrava, Czechy, Sbornik vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, monografie 15, rok 2005, ročník LI, řada hornicko-geologická, 2005, 51–56
- [7] Rychlicki S. (red.): *Adaptacja metod górnictwa naftowego do usuwania zanieczyszczeń węglowodorowych ze środowiska gruntowo-wodnego*. Kraków, UWND AGH 2006
- [8] Surygała J. (red.): *Zanieczyszczenia naftowe w gruncie*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2000