

Zbigniew Fafara*

**POZIOMA DYSPERSJA
STRUMIENIA WĘGLOWODORÓW W GRUNCIE
WEDŁUG BADAŃ LABORATORYJNYCH****

1. WPROWADZENIE

Migracji zanieczyszczeń ropopochodnych w gruncie towarzyszy dyspersja: podłużna – w kierunku filtracji oraz poprzeczna – prostopadła do kierunku filtracji. Dyspersja podłużna powoduje rozmycie frontu filtrujących zanieczyszczeń. Większe znaczenie ma dyspersja poprzeczna strumienia węglowodorów. Jej wielkość decyduje o ilości zanieczyszczeń zatrzymanych w gruncie w wyniku procesów sorpcyjnych [1]. Na wielkość dyspersji zanieczyszczeń ropopochodnych w gruncie decydujący wpływ mają dwa procesy: dyspersja hydrodynamiczna i dyfuzja molekularna. Ich aktywność uzależniona jest od właściwości fizykochemicznych ośrodka i substancji zanieczyszczającej. Liczne badania eksperymentalne pokazały [np. 2, 3], że dyfuzja molekularna ma istotne znaczenie jedynie przy bardzo małych prędkościach filtracji w ośrodkach słabo przepuszczalnych. Dla wyższych prędkości filtracji, w warunkach zgodnych z prawem Darcy'ego, istotne znaczenie ma przede wszystkim dyspersja hydrodynamiczna (mechaniczna) związana z porowatością ośrodka, zróżnicowaniem prędkości płynu w przestrzeni porowatej i krętością elementarnych strug płynu.

Współczynnik dyspersji wyraża się następującego:

$$D_X = D_M + \alpha_X \cdot v \quad (1)$$

gdzie:

D_X – współczynnik dyspersji podłużnej dla $X = L$ i dyspersji poprzecznej dla $X = T$,

D_M – współczynnik dyfuzji molekularnej,

α_X – stała dyspersji podłużnej dla $X = L$ i poprzecznej dla $X = T$ mająca wymiar długości,

v – prędkość filtracji.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca wykonana w ramach badań statutowych

Przy bardzo małych prędkościach filtracji węglowodorów drugi składnik po prawej stronie wyrażenia (1) odpowiedzialny za dyspersję hydrodynamiczną jest do pominięcia. Przy wyższych prędkościach filtracji dyfuzja molekularna jest nieistotna i jej współczynnik można pominąć.

Według Szestakowa [4] stała dyspersji podczas filtracji substancji ropopochodnej w gruncie piaszczystym przyjmuje następujące wartości:

$$\alpha_L = (0,1 - 1,0) \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (2)$$

$$\alpha_T = (0,05 - 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Liczne badania eksperymentalne [np. 4] potwierdziły słuszność zależności (1) i (2) dla jednorodnych gruntów piaszczystych gruboziarnistych i średnioziarnistych, a także drobnoziarnistych o znacznie niższych prędkościach filtracji substancji ropopochodnej. W gruntach niejednorodnych pojawiają się jednak problemy ze stosowalnością modelu (1). W szczególności dotyczą one dosyć częstych przypadków utworów niejednorodnych, zbudowanych z przewarstwiających się osadów o różnej przepuszczalności, na przykład ilastych i piaszczystych – tzw. zjawisko makrodyspersji. W warstwach dobrze przepuszczalnych zachodzi wówczas głównie przenoszenie konwekcyjne, natomiast w przewarstwiających je utworach słabo przepuszczalnych – zjawisko dyfuzji poprzecznej. Początkowo węglowodory wnikają jedynie w peryferyjne części utworów słabo przepuszczalnych, wskutek czego dyspersję można rozpatrywać w każdej warstwie dobrze przepuszczalnej osobno jako mikrodyspersję, pomijając dyfuzję poprzeczną. Opis matematyczny tego procesu podał między innymi Szestakow [4].

Szestakow [4] zauważył także inną prawidłowość dla gruntów jednorodnych o małej prędkości filtracji – grunty piaszczyste drobnoziarniste, w których proces filtracji zanieczyszczeń ropopochodnych przebiega wolno i rozciąga się w dłuższym czasie. Początkowo mało istotna dla dyspersji dyfuzja molekularna węglowodorów, z upływem czasu nabiera na znaczeniu, na skutek kumulowania się ilości dyfundujących w gruncie zanieczyszczeń. Szestakow zauważył, że w dłuższym czasie współczynnik dyspersji jest proporcjonalny do kwadratu prędkości filtracji substancji ropopochodnej:

$$D = \alpha \cdot v^2 \quad (3)$$

gdzie:

- D – współczynnik dyspersji (podłużnej lub poprzecznej),
- α – stała dyspersji (podłużnej lub poprzecznej) zależna od właściwości ośrodka gruntowego i obejmująca dyfuzję molekularną; posiada wymiar czasu (Szestakow [4] dla piasków eoceńskich na Uralu otrzymał wartość $\alpha = 135$ dni),
- v – prędkość filtracji.

Przy wzroście prędkości filtracji substancji ropopochodnej w gruncie (generalnie dla dużych prędkości filtracji) współczynnik dyspersji staje się liniową funkcją prędkości filtracji według wzoru:

$$D = \alpha \cdot v \quad (4)$$

Zamieszczone rozważania pokazują, że wzrost z głębokością promienia strefy skażonej węglowodorami, podczas filtracji pionowej zanieczyszczeń ropopochodnych w gruncie jest funkcją prędkości filtracji. Ta z kolei zależy od geometrii kanałów porowych ośrodka gruntowego, która jest ściśle powiązana ze składem granulometrycznym gruntu. Niniejsza praca ma na celu poszukiwanie zależności pomiędzy średnicą efektywną gruntu, wybrany parametr charakteryzujący jego skład granulometryczny, a przyrostem z głębokością promienia obszaru skażonego przez filtrujące zanieczyszczenia ropopochodne w kierunku pionowym. Rozważania takie mogą stanowić wstęp do przeprowadzenia w przyszłości omówionej powyżej analizy współczynnika dyspersji węglowodorów, przy potwierdzeniu postawionej tezy.

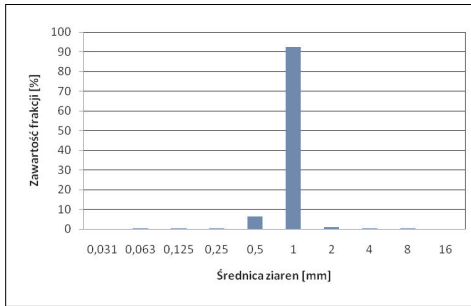
2. PRZYGOTOWANIE MODELI GRUNTU

Na potrzeby badań przygotowano cztery wzorcowe, specjalnie wyselekcjonowane modele gruntu sypkiego, oznaczane w dalszej części pracy symbolami: G1, G2, G3 i G4. W trakcie bezpośrednich pomiarów laboratoryjnych określono ich podstawowe właściwości fizyczne: porowatość, gęstość objętościową oraz skład granulometryczny. Oceny wybranych właściwości gruntów wzorcowych oraz parametrów charakteryzujących rozkład ziaren zamieszczono w tabeli 1.

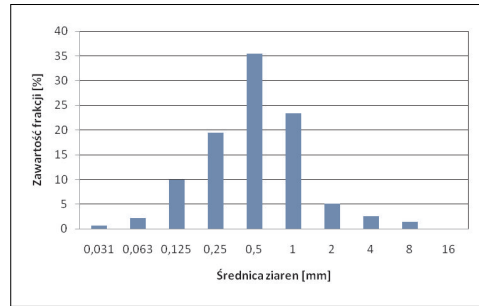
Tabela 1
Charakterystyka gruntów wzorcowych

Lp.	Parametr	Grunt wzorcowy			
		G1	G2	G3	G4
1	Mediana d_{50} [mm]	0,685	0,355	0,179	0,182
2	Średnica efektywna d_{ef} [mm]	1,241	0,427	0,311	0,283
3	Współczynnik niejednorodności U [-]	1,4	4,1	1,3	2,8
4	Porowatość n [%]	22,5	21,5	25,0	15,0
5	Gęstość objętościowa w stanie luźnym ρ_{min} [g/cm ³]	1,492	1,432	1,454	1,519
6	Gęstość objętościowa w stanie zagęszczonym ρ_{max} [g/cm ³]	1,665	1,693	1,642	1,727

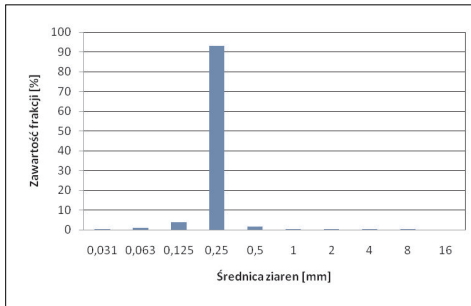
Na rysunkach 1–4 przedstawiono histogramy rozkładu ziaren dla poszczególnych gruntów wzorcowych.



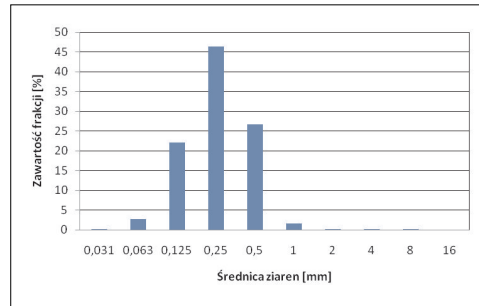
Rys. 1. Grunt wzorcowy G1



Rys. 2. Grunt wzorcowy G2



Rys. 3. Grunt wzorcowy G3



Rys. 4. Grunt wzorcowy G4

Grunt wzorcowy G1 według polskiej normy (PN-98/B-02481 i PN-98/R-04033) można sklasyfikować jako piasek gruboziarnisty. Dominuje frakcja w przedziale 1–2 mm stanowiąca prawie 92,5% masy szkieletu mineralnego (rys. 1). W skład gruntu wchodzi tylko 3 frakcje od 0,5 mm do 2 mm. Bliska jedności wartość współczynnika niejednorodności $U = 1,444$ oznacza że jest to grunt równoziarnisty ($U < 5$). Średnica efektywna jest równa $d_{ef} = 1,24$ mm. Analizowany materiał stanowi mieszaninę piasku grubego o udziale 98%, pozostała niewielka część to piasek średnio i drobno ziarnisty (PN-98/B-02481 i PN-98/R-04033).

Grunt G2 według polskiej normy można sklasyfikować jako piasek średnioziarnisty. Dominują ziarna o średnicach w przedziale 0,25–1 mm, które stanowią 78% masy szkieletu mineralnego, co przedstawiono na rysunku 2. Współczynnik niejednorodności $U = 4,114$, co nadal wskazuje na materiał równoziarnisty, ale wartość U jest bliska umownej granicy 5, powyżej której grunty traktuje się jako nierównoziarniste. Średnica efektywna jest trzykrotnie mniejsza, niż dla gruntu G1. Analizowany materiał stanowi mieszaninę piasku grubego o udziale 35% oraz średniego – 60%, z niewielką domieszką żwiru o udziale blisko 4%.

Grunt wzorcowy G3 według polskiej normy można sklasyfikować jako piasek średnioziarnisty. Dominuje jedna frakcja z przedziału 0,25–0,5 mm, stanowiąca ponad 93% masy szkieletu mineralnego gruntu (rysunek 3). W konsekwencji współczynnik niejednorodności wynosi tylko $U = 1,317$. Średnica efektywna jest cztery razy mniejsza, niż w gruncie G1.

Grunt G4 według polskiej normy można sklasyfikować jako piasek drobnoziarnisty. Dominują ziarna o średnicach w przedziale 0,125–0,5 mm, stanowiące ponad 73% szkieletu mineralnego, co przedstawia rysunek 4. Wartość współczynnika niejednorodności $U = 2,759$ wskazuje na materiał równoziarnisty, ponieważ jest mniejsza od 5. Średnica efektywna jest prawie pięciokrotnie niższa, niż dla gruntu G1. Analizowany materiał stanowi mieszaninę piasku drobnego o udziale 46% oraz średniego i grubego w zbliżonych proporcjach.

3. BADANIA LABORATORYJNE DYSPERSJI

Na potrzeby badania dyspersji poziomej węglowodorów w gruncie przygotowano specjalne stanowisko pomiarowe, którego głównym elementem było naczynie szklane o wymiarach: długość – 20 cm, wysokość – 15 cm, szerokość – 6 cm. Wewnątrz naczynia 2 cm powyżej dna zamontowano poziomą perforowaną ściankę, zabezpieczającą przed spiętrzaniem się ciekłych węglowodorów w dolnej części gruntu. W górnej części jednej z mniejszych ścianek pionowych naczynia zamontowano centrycznie element umożliwiający w sposób powtarzalny wprowadzanie zanieczyszczeń ropopochodnych po modelu gruntu, które rozlewano na jego powierzchni.

W trakcie pomiaru naczynie szklane wypełniano fizycznym modelem gruntu otrzymanym przez zmieszanie w określonej proporcji gruntów wzorcowych. Uwzględniono następujące przypadki:

1. Seria pomiarowa I:
 - a. 100% gruntu wzorcowego G1
 - b. 75% gruntu wzorcowego G1 + 25% gruntu wzorcowego G4
 - c. 50% gruntu wzorcowego G1 + 50% gruntu wzorcowego G4
 - d. 25% gruntu wzorcowego G1 + 75% gruntu wzorcowego G4
 - e. 100% gruntu wzorcowego G4
2. Seria pomiarowa II:
 - a. 100% gruntu wzorcowego G2
 - b. 75% gruntu wzorcowego G2 + 25% gruntu wzorcowego G3
 - c. 50% gruntu wzorcowego G2 + 50% gruntu wzorcowego G3
 - d. 25% gruntu wzorcowego G2 + 75% gruntu wzorcowego G3
 - e. 100% gruntu wzorcowego G3

Kruszywo wcześniej suszono w temperaturze 110 °C.

Do badań użyto najczęściej stosowane przez człowieka produkty naftowe – etylinę bezołowiową i olej napędowy. Przed zasadniczymi pomiarami określono podstawowe właściwości fizyczne substancji ropopochodne: gęstość właściwą, napięcie powierzchniowe oraz dynamiczny współczynnik lepkości. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2

Podstawowe właściwości fizyczne substancji ropopochodnych

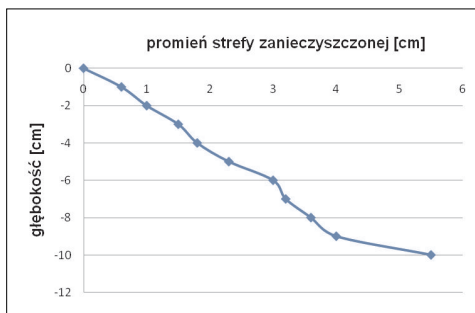
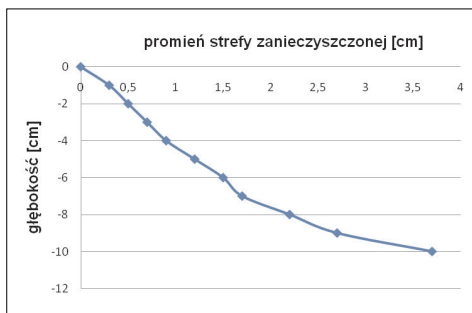
Lp.	Parametr	Etylina	Olej napędowy
1	Gęstość właściwa ρ [g/cm^3]	0,755	0,837
2	Napięcie powierzchniowe σ [N/m]	0,022	0,024
3	Dynamiczny współczynnik lepkości η [Ns/m^2]	0,0027	0,0125

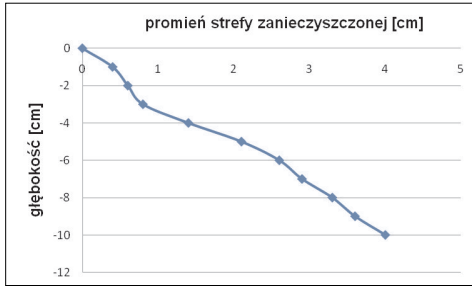
Substancje ropopochodne przed wprowadzeniem do gruntu zabarwiano na kolor niebieski. Wykorzystano wizualną metodę detekcji węglowodorów. Substancje ropopochodne filtrując w modelu gruntu przemieszczały się w objętości odwróconego stożka o rosnącym z głębokością promieniu podstawy, na skutek dyspersji poziomej węglowodorów. Pomiar polegał na punktowej rejestracji zmian poziomego zasięgu filtrującej substancji ropopochodnej z głębokością.

Pomiary poziomej dyspersji etyliny i oleju napędowego zrealizowano w 10 różnych fizycznych modelach gruntu, każdy powtórzony czterokrotnie – razem 80 pojedynczych pomiarów. Otrzymane wartości uśredniano i wykorzystano w dalszych obliczeniach. Na potrzeby prowadzonych rozważań ilościowych poziomą dyspersję filtrujących węglowodorów reprezentowano za pomocą tempa przyrostu w poziomie zasięgu strefy zanieczyszczonej węglowodorami – tangens kąta nachylenia prostej. W dalszej części pracy parametr ten będzie nazywany dyspersją.

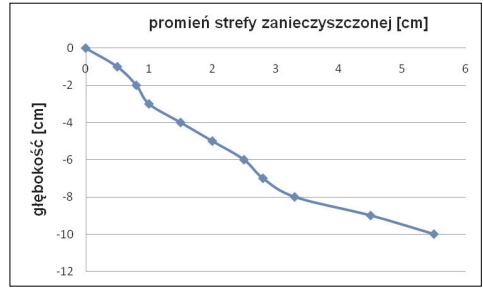
4. ANALIZA WYNIKÓW

Z uwagi na ograniczone ramy niniejszej pracy na rysunkach 5–14 zostały zaprezentowane przykładowe wyniki pomiaru poziomej dyspersji strumienia węglowodorów dla modeli gruntu pierwszej serii pomiarowej, dla obu użytych substancji ropopochodnych.

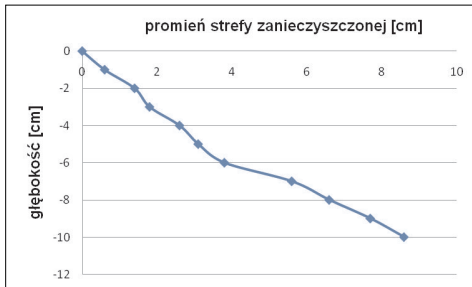
**Rys. 5.** Etylina – 100% G1**Rys. 6.** Etylina – 75% G1 + 25% G4



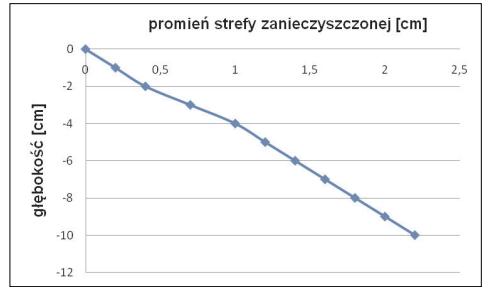
Rys. 7. Etylina – 50% G1 + 50% G4



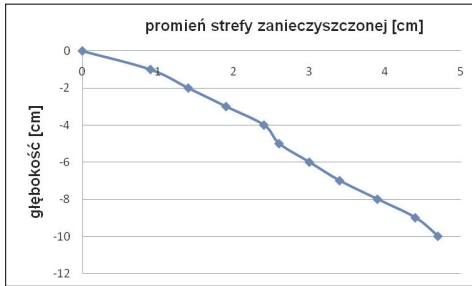
Rys. 8. Etylina – 25% G1 + 75% G4



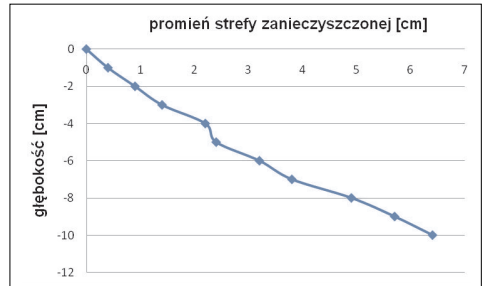
Rys. 9. Etylina – 100% G4



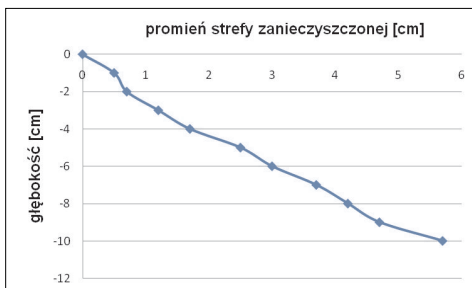
Rys. 10. Olej napędowy – 100% G1



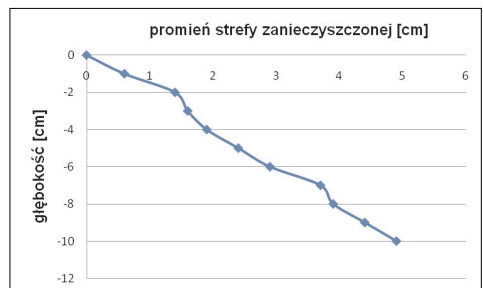
Rys. 11. Olej napędowy – 75% G1 + 25% G4



Rys. 12. Olej napędowy – 50% G1 + 50% G4



Rys. 13. Olej napędowy – 25% G1 + 75% G4

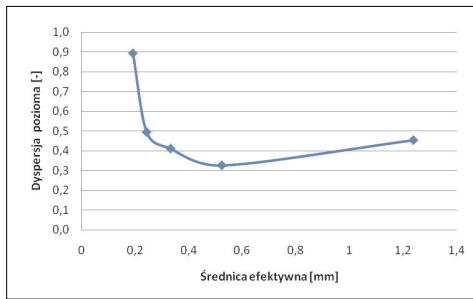


Rys. 14. Olej napędowy – 100% G4

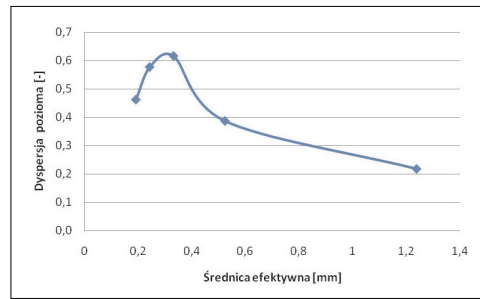
Wyniki bezpośrednich pomiarów wzrostu promienia strefy zanieczyszczonej węglodorami z głębokością cechują się bardzo dobrą korelacją danych, nie tylko dla zamieszczonych 10 przypadków. Dla etyliny na 40 zrealizowanych pomiarów tylko raz współczynnik korelacji Pearsona mieścił się w przedziale 0,6–0,7, sześć razy w przedziale 0,8–0,9, natomiast w 33 przypadkach był wyższy od 0,9. Dla oleju napędowego dla każdego z 40 wykonanych pomiarów współczynnik korelacji Pearsona był wyższy od wartości 0,9.

W modelu gruntu składającego się z 75% G1 i 25% G4 (rys. 6) dyspersja pozioma strumienia etyliny jest mniejsza, niż w gruncie wzorcowym G1 (rys. 5), natomiast dalszy wzrost ilości gruntu wzorcowego G4 w modelu gruntu powoduje zwiększanie dyspersji (rys. 7–9). W przypadku oleju napędowego dyspersja pozioma początkowo rośnie uzyskując maksimum dla modelu gruntu składającego się z 50% G1 i 50% G4 (rys. 10–12), a następnie maleje (rys. 13–14).

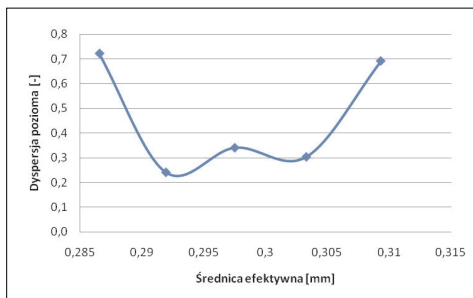
W kolejnym kroku, metodą najmniejszych kwadratów dopasowano dla każdego z 80 przypadków postać prostej regresji. Następnie uśredniono współczynniki kierunkowe prostych dla każdej czwórki pomiarów, dotyczących tej samej substancji ropopochodnej i tego samego fizycznego modelu gruntu. Uzyskane w ten sposób uśrednione wartości tangensa kąta nachylenia prostej regresji, czyli dyspersji poziomej strumienia etyliny i oleju napędowego, przedstawiono na rysunkach 15–18 w funkcji rodzaju modelu gruntu, reprezentowaną przez wartość średnicy efektywnej.



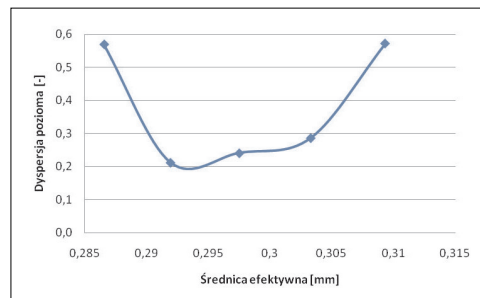
Rys. 15. Etylina – I seria pomiarowa



Rys. 16. Olej napędowy – I seria pomiarowa



Rys. 17. Etylina – II seria pomiarowa



Rys. 18. Olej napędowy – II seria pomiarowa

Ogólnie znany jest fakt, że wielkość dyspersja poprzecznej strumienia filtrujących w gruncie węglowodorów jest odwrotnie proporcjonalna do prędkości filtracji substancji ropopochodnej. Prawidłowość tą wykazują także wyniki uzyskane dla pierwszej serii pomiarowej. Użyte w tym przypadku modele gruntu cechują się dużą zmiennością średnicy efektywnej (wartości w przedziale 0,28–1,24 mm), co przekłada się na zróżnicowanie prędkości filtracji węglowodorów. Generalnie zarówno dla etyliny, jak i dla oleju napędowego dyspersja pozioma strumienia węglowodorów rośnie wraz ze spadkiem średnicy efektywnej. Pojawiające się nieprawidłowości można powiązać ze stopniem wysortowania ziaren gruntu.

Dla etyliny w I serii pomiarowej (rys. 15) dyspersja pozioma strumienia węglowodorów początkowo nieznacznie maleje ze spadkiem średnicy efektywnej, ale może to być wynikiem wzrostu niejednorodności uziarnienia modelu gruntu po zmieszaniu gruntu wzorcowego G1 z G4, co w konsekwencji powoduje wzrost prędkości filtracji węglowodorów. Dopiero przewaga w składzie ziarnowym modelu gruntu drobnoziarnistego gruntu wzorcowego G4 powoduje obniżenie prędkości filtracji węglowodorów i wzrost dyspersji. W przypadku oleju napędowego (rys. 16) dyspersja pozioma generalnie rośnie ze spadkiem średnicy efektywnej gruntu. Odstępstwo od tej tendencji dla modeli gruntu o najmniejszych średnicach efektywnych ziaren może być wynikiem niedokładności pomiarowych.

W drugiej serii pomiarowej zróżnicowanie średnic efektywnych modeli gruntu jest minimalne, dlatego decydować zaczyna stopień wysortowania ziaren. Zgodnie z oczekiwaniami dyspersja pozioma strumienia etyliny i oleju napędowego maleje dla modeli mieszanych gruntu, powstałych z wymieszania w określonej proporcji modelu wzorcowego G2 i G3. Wzrost współczynnika niejednorodności powoduje niewielki wzrost prędkości filtracji węglowodorów. W przypadkach odpowiadających wzorcowym modelom gruntu G2 i G3, stopień wysortowania kruszywa jest największy (współczynnik niejednorodności najmniejszy), dlatego prędkość filtracji węglowodorów jest najmniejsza, a dyspersja pozioma jest największa.

5. WNIOSKI

Uzyskane w eksperymencie wyniki pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Potwierdzono ogólnie znany fakt zależności wielkości poziomej dyspersji strumienia węglowodorów filtrujących w kierunku pionowym od prędkości filtracji.
2. Uzyskano ilościowe informacje na temat tempa przyrostu z głębokością promienia strefy zanieczyszczonej węglowodorami podczas ich filtracji w gruncie, dla różnych rodzajów gruntu. Dane te mogą być wykorzystane do szacowania retencji węglowodorów dla konkretnych rodzajów gruntu.
3. W gruntach piaszczystych promień strefy zanieczyszczonej etyliną wzrasta w tempie od 40% do 80% drogi filtracji w kierunku pionowym.

4. W gruntach piaszczystych promień strefy zanieczyszczonej olejem napędowym wzrasta nieco wolniej niż etyliny, w tempie od 20% do 60% drogi filtracji w kierunku pionowym.
5. Potwierdzono w ten sposób znany fakt odwrotnej proporcjonalności pomiędzy wielkością dyspersji poprzecznej i lepkością filtrującego płynu. Dyspersja etyliny jest około dwa razy większa od dyspersji oleju napędowego, który ma pięciokrotnie wyższy współczynnik lepkości.
6. Wykazano zależność dyspersji poziomej strumienia węglowodorów filtrujących w gruncie od jego składu granulometrycznego, opisanego za pomocą średnicy efektywnej ziaren i parametru charakteryzującego stopień wysortowania ziaren (np. współczynnik niejednorodności).
7. Generalnie dyspersja pozioma wzrasta ze spadkiem średnicy efektywnej ziaren gruntu.
8. Generalnie dyspersja pozioma wzrasta ze wzrostem stopnia wysortowania ziaren gruntu.
9. Zależność poziomej dyspersji od średnicy efektywnej posiada zasadniczy i dominujący charakter.
10. Zebrane dane ilościowe powinny pozwolić na bardziej szczegółową analizę procesu dyspersji poprzecznej strumienia węglowodorów filtrujących w gruncie piaszczystym, łącznie z próbą dopasowania modelu matematycznego, który umożliwi szacowanie wielkości dyspersji poprzecznej na podstawie wybranych właściwości gruntu.

LITERATURA

- [1] Fąfara Z.: *Badanie procesu migracji substancji ropopochodnych w ośrodku grunto-wo-wodnym*. Rozprawy Monografie nr 168, UWND AGH, Kraków 2007
- [2] Reintjes R.C., Schuler C.: *Ten years experience In thermal soil treatment*. [w:] Arend F. Hinsenveld M., Brink van den W.J, Contaminated, Soils '90, vol. II, 1990
- [3] Mazurek K., Pawula A.: *Dyspersja zanieczyszczeń chemicznych w ośrodku porowatym i jej symulacja na modelach cyfrowych*. Biuletyn instytutu Kształtowania Środowiska, Warszawa 1980
- [4] Jordan H.P., Kleczkowski A.S. (red.), Szestakow W.M., Silar J., Witczak S.: *Ochrona wód podziemnych*. WNT, Warszawa 1984