

Zbigniew Fąfara*, Stanisław Rychlicki*

**WPLYW WŁAŚCIWOŚCI GRUNTU
NA MIGRACJĘ WĘGLOWODORÓW
NA PODSTAWIE BADAŃ LABORATORYJNYCH****

1. WSTĘP

Jednym z czynników decydujących o przebiegu migracji substancji ropopochodnej w gruncie są jego właściwości, co wykazano w licznych opracowaniach na ten temat [np. 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 11]. Wykonanie odpowiednio przygotowanych pomiarów na stanowisku laboratoryjnym spełniającym kryteria podobieństwa pozwala na zorientowanie się w skali wzajemnych powiązań poszczególnych czynników i zasadności przyjmowanych uproszczeń, które są zazwyczaj nieodzowne przy próbie wykorzystania metod numerycznych do symulacji procesów fizycznych. Omówione w niniejszej pracy badania są przykładem jednych z wielu pomiarów laboratoryjnych, jakie wykonano do tej pory [np. 2, 3, 6, 10].

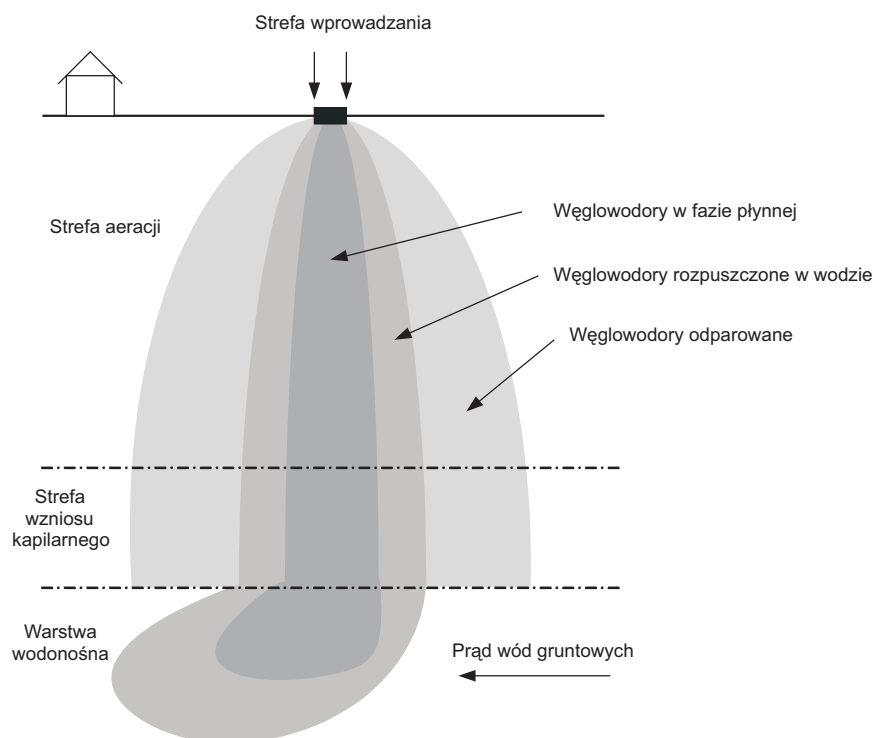
2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Uwolnienie substancji ropopochodnej na powierzchni gruntu prowadzi do jej migracji w głąb ośrodka gruntowo-wodnego [1, 6, 7, 10, 11], w ogólnym przypadku najpierw przez strefę aeracji, później wzniosu kapilarnego i kończąca się w obrębie warstwy wodonośnej. W migracji tej można wydzielić trzy różne mechanizmy (rys. 1).

Początkowo (pierwszy mechanizm) przesiąkające węglowodory migrują w fazie płynnej w kierunku pionowym w dół i w bok (poziomo) przez strefę aeracji pod wpływem sił grawitacyjnych i kapilarnych [6, 10]. Jeżeli wprowadzone węglowodory (lub ich część) są cięższe niż woda, to migracja zanieczyszczeń w fazie płynnej w kierunku pionowym jest kontynuowana w kanałach kapilarnych strefy wzniosu kapilarnego i później warstwy wodonośnej aż do momentu, gdy przejdą w stan resztkowego nasycenia lub napotkają na swej drodze niepenetrowalny horyzont geologiczny.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca została wykonana w ramach grantu WWNiG AGH nr 18.25.190.270



Rys. 1. Schemat mechanizmów migracji węglowodorów w gruncie

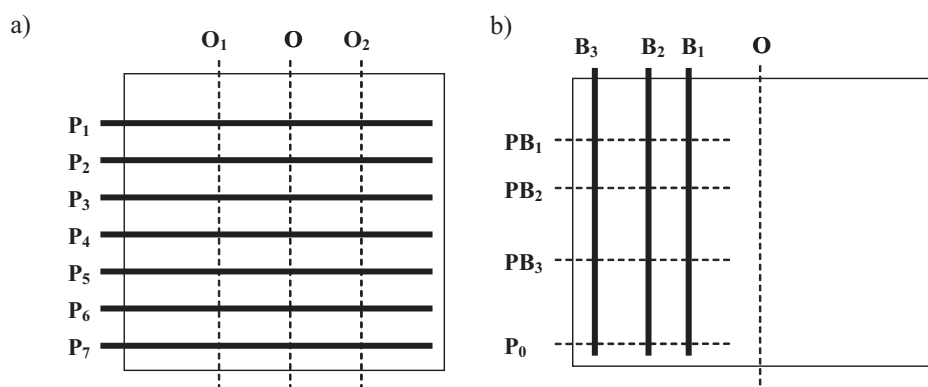
Drugi mechanizm transportu zanieczyszczeń ropopochodnych w gruncie jest związany z rozpuszczaniem i/lub rozpraszaniem niektórych węglowodorów w fazie wodnej i ich migracja wraz z filtrującą wodą [6, 7, 10]. Proces ten może przebiegać w całym obszarze ośrodka gruntowego od strefy aeracji, przez strefę wzniosu kapilarnego do warstwy wodonośnej. Zdolność do rozpuszczania węglowodorów w wodzie sprawia, że zasięg transportu tego typu jest rozleglejszy od poprzednio omówionego. Mechanizmowi temu towarzyszy też w strefie przejściowej adsorpcja cząsteczek węglowodorów i przechodzenie ich w stan nasycenia resztkowego.

Węglowodory transportowane za pomocą pierwszego i drugiego mechanizmu, które ostatecznie dotarły do wnętrza warstwy wodonośnej, będą dodatkowo przemieszczane w kierunku poziomym przez wody podziemne.

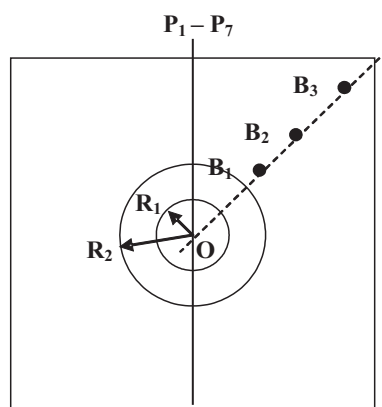
Trzeci mechanizm migracji dotyczy transportu części składników substancji ropopochodnej w postaci pary w gazach gruntowych. Na kierunek migracji ma wpływ gęstość właściwa tworzących się par [6, 7, 10]. Jeżeli wymieszanie się par węglowodorów z gazami gruntowymi prowadzi do zmniejszenia ich gęstości właściwej, wymuszony jest ruch par do góry. W przeciwnym wypadku pary będą przemieszczały się w dół. Rozdzielenie węglowodorów między fazę gazową i wodną podnosi w konsekwencji potencjał migracji niektórych składników. Migracja par ma miejsce w strefie aeracji i wzniosu kapilarnego.

3. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Stanowisko pomiarowe obejmuje trzy niezależne komory przeznaczone dla różnych modeli gruntu. Każda z komór jest w przybliżeniu sześcianem o krawędzi 1,25 m [5]. Doboru wymiarów geometrycznych dokonano na podstawie analizy kryteriów podobieństwa charakteru zjawisk filtracji zanieczyszczeń na laboratoryjnym stanowisku pomiarowym i w rzeczywistym gruncie [4]. W każdej z komór zamontowano szereg perforowanych rurek PCV do bezpośredniej analizy składu gazów gruntowych na obecność par węglowodorów. Schemat ułożenia rurek pomiarowych przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Przekrój pionowy przez stanowisko pomiarowe – poziome (a) i pionowe (b) rurki pomiarowe. Oznaczenia: P_{*i*} – poziome perforowane rurki pomiarowe do wykrywania obecności par węglowodorów w gazach gruntowych (długość 135 cm), dla *i* = 1, ..., 7, O – pionowa oś stanowiska pomiarowego, O₁ do O₂ – zakres perforowania poziomych rurek pomiarowych (długość 50 cm), B_{*i*} – pionowe perforowane rurki pomiarowe do wykrywania obecności par węglowodorów w gazach gruntowych (długość 135 cm), dla *i* = 1, ..., 3, P₀ – dolna granica perforowania pionowych rurek pomiarowych (głębokość 115 cm), PB_{*i*} – górna granica perforowania pionowej *i*-tej rurki pomiarowej



Rys. 3. Przekrój poziomy przez komorę stanowiska pomiarowego

Tabela 1 zawiera ilościową charakterystykę lokalizacji w modelu poziomych rurek PCV, natomiast w tabeli 2 podano podobne informacje w odniesieniu do rurek pionowych.

Na rysunku 3 pokazano kierunek ułożenia rurek poziomych (P_1 – P_7), miejsce usytuowania rurek pionowych (B_1 – B_3), oraz proponowaną strefą wprowadzania zanieczyszczeń węglowodorowych na powierzchni (koło o środku w punkcie O i promieniu R_1) i zasięg perforacji poziomych rurek pomiarowych (okrąg o środku w punkcie O i promieniu R_2). Zazwyczaj zasięg perforowania poziomych rurek pomiarowych ($R_1 = 25$ cm) był większy od zasięgu strefy wprowadzania zanieczyszczeń (R_2 zmieniało się od 11 do 27 cm), co uzależnione było od zdolności wchłaniania substancji ropopochodnej przez grunt.

Tabela 1

Głębokość ułożenia poziomych rurek PCV liczona od powierzchni modelu gruntu

Symbol rurki	Głębokość [cm]	Symbol rurki	Głębokość [cm]
P_1	25	P_5	85
P_2	40	P_6	100
P_3	55	P_7	115
P_4	70	–	–

Tabela 2

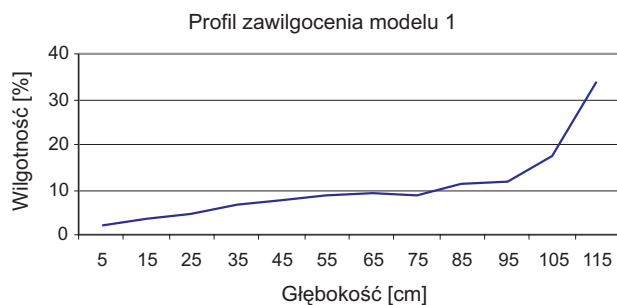
Położenie i granice perforowania pionowych rurek PCV

Lp.	Symbol rurki	Odległość w poziomie od osi O [cm]	Głębokość górnej granicy perforowania [cm]	Głębokość dolnej granicy perforowania [cm]
1	B_1	30,0	30,0	115,0
2	B_2	50,0	50,0	115,0
3	B_3	75,0	75,0	115,0

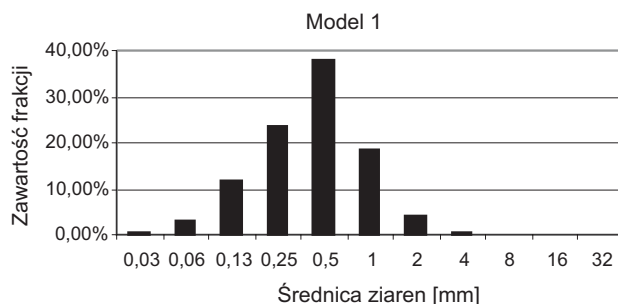
Pomiar polegał na zassaniu gazów gruntowych, jakie zebrały się w danej rurce pomiarowej (przed mieszaniem się gazów gruntowych z powietrzem atmosferycznym zabezpieczono się zamykając rurkę pomiarową pomiędzy pomiarami gumowym kapturkiem) do komory pomiarowej przyrządu Multiwarn II firmy Dräger i analizie koncentracji węglowodorów wybuchowych przy użyciu czujnika podczerwieni. Wynik pomiaru podawany był w % obj. koncentracji par węglowodorów wybuchowych przeliczonej na odpowiadającą jej (ekwiwalentną) koncentrację propanu (maksymalny zakres pomiarowy – 100% obj.). Rejestrowany sygnał cechował się niewielkim opóźnieniem czasowym, koniecznym do wypompowania gazu z rurki PCV, zanim do czujnika zostaną doprowadzone właściwe gazy gruntowe. Objętość rurki była mniejsza niż 0,35 l. Minimalny wydatek pompki ustawiono na 5 l/min. Wynika stąd, że opóźnienie było mniejsze niż 5 s, co w praktyce nie miało istotnego znaczenia dla dokładności prowadzonych badań.

4. CHARAKTERYSTYKA MODELI GRUNTU

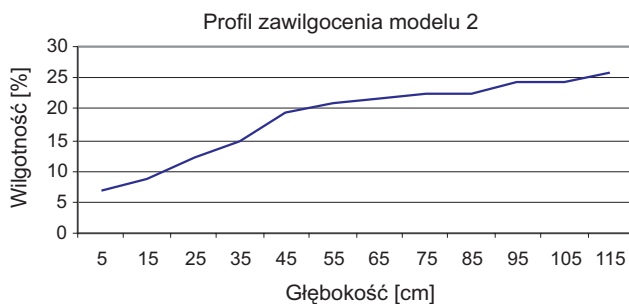
W drodze badań laboratoryjnych i analizy ich wyników określono podstawowe właściwości przygotowanych modeli fizycznych gruntu. Wykonano pomiary porowatości, gęstości właściwej, profilu zawilgocenia oraz analizę granulometryczną. Na rysunkach 4, 6, 8 przedstawiono głębokościowy profil zawilgocenia modeli gruntu (część przestrzeni porowej zajęta przez wodę), natomiast na rysunkach 5, 7, 9 pokazano histogramy zawartości masowej poszczególnych frakcji ziarnowych po sprowadzeniu granic przedziałów klasowych do skali Wentwortha.



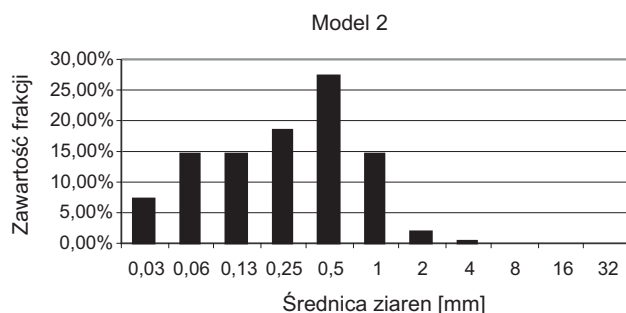
Rys. 4. Profil zawilgocenia dla modelu fizycznego gruntu piaszczystego (model 1)



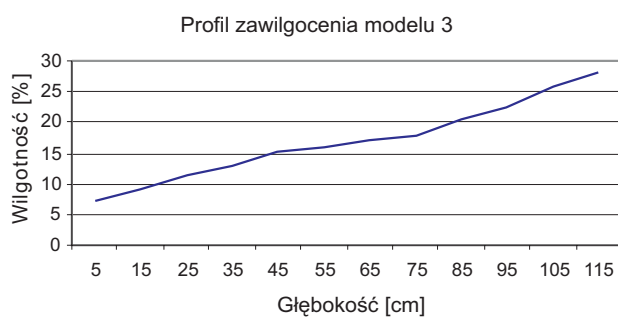
Rys. 5. Histogram rozkładu ziaren dla modelu fizycznego gruntu piaszczystego (model 1)



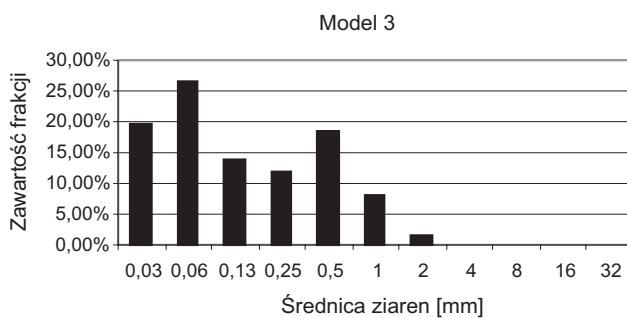
Rys. 6. Profil zawilgocenia dla modelu fizycznego gruntu piaszczysto-pyłastego (model 2)



Rys. 7. Histogram rozkładu ziaren dla modelu fizycznego gruntu piaszczysto-pyłastego (model 2)



Rys. 8. Profil zawilgocenia dla modelu fizycznego gruntu piaszczysto-pyłastego (model 3)



Rys. 9. Histogram rozkładu ziaren dla modelu fizycznego gruntu piaszczysto-pyłastego (model 3)

W tabeli 3 zamieszczono wyniki pomiarów bezpośrednich (porowatość i gęstość właściwa) oraz przeliczeń (średnica efektywna i współczynnik przepuszczalności absolutnej). Model gruntu 1 można uważać za reprezentatywny dla gruntów piaszczystych, natomiast dwa pozostałe za reprezentatywne dla gruntów piaszczysto-pyłastych.

Tabela 3

Estymacja wybranych właściwości przygotowanych fizycznych modeli gruntu

Parametr	Numer modelu		
	1	2	3
$\rho_{d,min}$ [g/cm ³]	1,456	1,556	1,571
$\rho_{d,max}$ [g/cm ³]	1,689	1,867	1,850
n [%]	38,2	39,6	35,2
d_{ef} [mm]	0,37	0,18	0,10
k [D]	70	18	4

5. WYNIKI POMIARÓW

Pomiary wykonano dla każdego fizycznego modelu gruntu, używając jako substancję zanieczyszczającą etylinę i olej napędowy. W oparciu o charakterystyki czasowe ekwiwalentnej koncentracji propanu w poszczególnych punktach pomiarowych odpowiadających rurkom ułożonym poziomo określono umowny moment dojścia węglowodorów do danej głębokości w drodze filtracji (przyjęto wartość progową koncentracji około trzy razy wyższą od tła, co odpowiadało 0,2% obj. dla etyliny i 0,1% obj. dla oleju napędowego). Umownemu momentowi dojścia węglowodorów odpowiada oszacowana umowna prędkość filtracji. Dla etyliny po uśrednieniu (w przybliżeniu wartość średniej odpowiada głębokości 0,55 m) wyniosła ona 2,58 mm/s w modelu 1, 0,54 mm/s w modelu 2 oraz 0,38 mm/s w modelu 3. Dla oleju napędowego otrzymano odpowiednio wartości: 0,46 mm/s, 0,20 mm/s i 0,16 mm/s. Wyniki te pokazują na zależność umownej prędkości filtracji od d_{ef} i k (tab. 3).

Analizując zmiany umownej prędkości filtracji pionowej z głębokością dla każdego z rozważonych przypadków, stwierdzono ich silną korelację z profilem zawilgocenia (rys. 4, 6, 8). Dla modelu 1 poniżej głębokości 1 m prędkość filtracji etyliny spada do około 1,62 mm/s, dla oleju napędowego do około 0,18 mm/s. W modelu 2 na głębokości 1,15 m odpowiednio do 0,19 mm/s dla etyliny i 0,10 mm/s dla oleju napędowego. W modelu 3 na głębokości 1,15 m wartości spadły do 0,18 mm/s dla etyliny i 0,07 mm/s dla oleju napędowego.

Kolejnym zaobserwowanym zjawiskiem jest zależność prędkości poziomej migracji par węglowodorów (szacowanej na identycznych zasadach, jak prędkość filtracji pionowej) i jego zasięgu od modelu gruntu. W tym wypadku wykorzystano sygnał zarejestrowany w pionowych rurkach pomiarowych. Prędkość migracji poprzecznej par etyliny w modelu 1 wyniosła około 0,63 mm/s, w modelu 2 – 0,54 mm/s a w modelu 3 – 0,47 mm/s. Maksymalna wartość zarejestrowanego sygnału w rurce B₃ wynosiła 10% w modelu 2 i 8% w modelu 3 wartości sygnału dla modelu 1.

Na podstawie wyników uzyskanych na przygotowanym stanowisku pomiarowym nie można przedyskutować wpływu porowatości gruntu na charakter i intensywność migracji węglowodorów, ponieważ modele gruntu posiadają zbliżone wartości współczynnika porowatości (od 36% do 39%).

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Wykonane pomiary laboratoryjne migracji substancji ropopochodnej w przygotowanych modelach fizycznych gruntu pozwoliły na ilościowe określenie wpływu właściwości gruntu na przebieg migracji węglowodorów. W szczególności stwierdzono, że:

- Średnia prędkość filtracji etyliny wyniosła 2,58 mm/s w modelu gruntu piaszczystego o współczynniku przepuszczalności $k = 70$ D i była prawie siedem razy większa w porównaniu z modelem gruntu piaszczysto-pyłastego o $k = 4$ D.
- Średnia prędkość filtracji oleju napędowego wyniosła 0,63 mm/s w modelu gruntu piaszczystego o przepuszczalności $k = 70$ D i była o 40% wyższa, niż w modelu gruntu piaszczysto-pyłastego o $k = 4$ D.
- Trzykrotny wzrost zawartości wilgoci w przestrzeni porowej modelu gruntu piaszczystego (z około 10% do 30%) spowodował spadek prędkości filtracji o około 60% dla etyliny i ponad trzykrotny dla oleju napędowego.
- Dwukrotny wzrost zawartości wilgoci w przestrzeni porowej modelu gruntu piaszczysto-pyłastego 3 (z około 15% do 30%) spowodował ponad dwukrotny spadek prędkości filtracji dla etyliny i oleju napędowego.
- Prędkość migracji poziomej par węglowodorów w modelu gruntu piaszczystego o $k = 70$ D jest o około 50% większa niż w modelu gruntu piaszczysto-pyłastego 3 o $k = 4$ D, natomiast umowna koncentracja par węglowodorów ponad 10 razy większa.

LITERATURA

- [1] Bear J. *et al.*: *Fundamentals of ground-water modeling*. Sprawozdanie z realizacji projektu Agencji Ochrony Środowiska USA nr EPA/540/S-92/005, Oklahoma, 1992 (www.epa.gov/ada/)
- [2] Breckenridge R.P. *et al.*: *Characterizing soils for hazardous waste site assessments*. Sprawozdanie z realizacji projektu Agencji Ochrony Środowiska USA nr EPA/540/4-91/003, Oklahoma, 1991 (www.epa.gov/ada/)
- [3] DiGiulio D.C.: *Evaluation of soil venting application*. Sprawozdanie z realizacji projektu Agencji Ochrony Środowiska USA nr EPA/540/S-92/004, Oklahoma, 1992 (www.epa.gov/ada/)
- [4] 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
- [5] Fąfara Z., Ryba A.: *Przygotowanie fizycznego modelu ośrodka gruntowego do badań laboratoryjnych*. Materiały XV Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Nowe metody i technologie w geologii naftowej, wiertnictwie, eksploatacji otworowej i gazownictwie”, WwNiG AGH, Krynica 2004
- [6] Guarnaccia J., Pinder G. *et al.*: *NAPL: simulator documentation*. Sprawozdanie z realizacji projektu Agencji Ochrony Środowiska USA nr CR-820499, the University of Vermont, Burlington, 2000 (www.epa.gov/ada/)

- [7] Newell C.J. *et al.*: *Light nonaqueous phase liquids*. Sprawozdanie z realizacji projektu Agencji Ochrony Środowiska USA nr EPA/540/S-95/500, Oklahoma, 1995 (www.epa.gov/ada/)
- [8] Newell C.J. *et al.*: *Calculation and use of first-order rate constants for monitored natural attenuation studies*. Sprawozdanie z realizacji projektu Agencji Ochrony Środowiska USA nr EPA/540/S-02/500, Oklahoma, 2002 (www.epa.gov/ada/)
- [9] Pinder G.F., Abriola M.L.: *On the simulation nonaqueous phase organic compounds in the subsurface*. *Water Resour. Res.*, 22 (9), 1986
- [10] Pope G.A. *et al.*: *Three-dimensional NAPL fate and transport model*. Sprawozdanie z realizacji projektu Agencji Ochrony Środowiska USA nr EPA/600/R-99/011, Austin Texas 1999 (www.epa.gov/ada/)
- [11] Ravi V., Williams J.R.: *Estimation of infiltration rate in the vadose zone: Compilation of simple mathematical models*. Sprawozdanie z realizacji projektu Agencji Ochrony Środowiska USA nr EPA/600/R-97/128a, Oklahoma, 1998 (www.epa.gov/ada/)