

Zbigniew Fąfara*, Włodzimierz Miska*

DYSKUSJA WPLYWU ZAWILGOCENIA GRUNTU NA PRĘDKOŚĆ FILTRACJI WĘGLOWODORÓW NA PODSTAWIE WYNIKÓW EKSPERYMENTALNYCH**

1. WPROWADZENIE

W celu badania dynamiki procesu migracji ropopochodnej substancji zanieczyszczającej w ośrodku gruntowo-wodnym przygotowano specjalne laboratoryjne stanowisko pomiarowe [1, 2]. Obejmuje ono trzy fizyczne modele gruntu niespoistego, reprezentujące grunty piaszczyste i piaszczysto-pylaste. Bezpośrednie badania laboratoryjne kruszyw, wykorzystanych do wykonania modeli gruntu pozwalają oszacować ich współczynnik przepuszczalności absolutnej na poziomie:

- fizyczny model 1 (FM1) – 100 darsy,
- fizyczny model 2 (FM2) – 10 darsy,
- fizyczny model 3 (FM3) – 6 darsy.

Każdy z modeli gruntu przygotowany został w postaci sześcianu o krawędzi 1,25 m. W jego wnętrzu osadzono na różnych głębokościach siedem rurek pomiarowych, pozwalających na wyprowadzanie na zewnątrz próbek gazu gruntowego. Badano je metodą atmo-geochemiczną na obecność par węglowodorów [1, 2]. użytymi substancjami zanieczyszczającymi była etylina bezołowiowa 95-oktanowa (ET), olej napędowy (ON) oraz lekka ropa kopalniana z kopalni Grobla (RG).

Uzyskane wyniki pomiarów posłużyły między innymi do oceny prędkości migracji pionowej rozważanych substancji ropopochodnych w przygotowanych sztucznych ośrodkach gruntowo-wodnych. Analizując otrzymane prędkości, stwierdzono, że jej wartość gwałtownie maleje ze wzrostem głębokości. Przeglądając właściwości przygotowanych modeli gruntu rozpoznano tylko jeden parametr charakteryzujący się tak silnym powiązaniem z głębokością – pierwotne zawilgocenie [1–3]. Podjęto próbę opisanie zmienności prędkości filtracji węglowodorów w oparciu o profil wilgotności gruntu.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca zrealizowana w ramach badań statutowych WWiNiG AGH

2. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Wyniki eksperymentalnej oceny prędkości migracji pionowej ropopochodnych substancji zanieczyszczających w przygotowanych fizycznych modelach gruntu, dla każdego z dziewięciu rozważanych przypadków zamieszczono w tabeli 1 [1]. Podane wartości określono w obrębie interwałów wyznaczonych lokalizacją rurek pomiarowych. Pierwszy z nich (licząc od powierzchni modelu gruntu) posiada długość 25 cm, natomiast pozostałe sześć 15 cm. W tabeli 1 podano średnią głębokość h_{sr} każdego interwału. W przypadku ropy z kopalni Grobla w FM2 i FM3 nie udało się w trakcie badań uchwycić momentu dojścia węglowodorów do ostatniej rurki pomiarowej, dlatego brakuje ocen prędkości.

Tabela 1

Eksperymentalna ocena prędkości migracji pionowej ropopochodnych substancji zanieczyszczających w przygotowanych fizycznych modelach gruntu

Substancja	ET	ET	ET	ON	ON	ON	RG	RG	RG
Model	FM1	FM2	FM3	FM1	FM2	FM3	FM1	FM2	FM3
Głębokość	Interwałowa prędkość migracji pionowej substancji ropopochodnej								
h_{sr} [cm]	v [mm/s]								
12,5	2,500	1,667	1,250	0,833	0,714	0,714	1,389	0,556	0,481
32,5	2,500	1,250	0,375	0,600	0,333	0,214	0,357	0,107	0,075
47,5	2,500	0,283	0,167	0,375	0,115	0,086	0,190	0,032	0,034
62,5	2,308	0,273	0,150	0,250	0,075	0,056	0,100	0,020	0,016
77,5	2,000	0,125	0,143	0,125	0,063	0,033	0,054	0,013	0,009
92,5	1,364	0,073	0,136	0,073	0,047	0,025	0,033	0,008	0,007
107,5	0,536	0,060	0,111	0,052	0,024	0,020	0,018	–	–
spadek	5	28	11	16	30	36	77	70	69

Najszybciej węglowodory migrują w FM1, cechującym się najwyższą wartością współczynnika przepuszczalności absolutnej. Migracja jest znacznie wolniejsza w FM2 i najwolniejsza w FM3. Wartości prędkości migracji w każdym przypadku bardzo wyraźnie maleją wraz ze wzrostem głębokości. W odniesieniu do pierwszego i ostatniego interwału spadek ten (ostatni wiersz tab. 1) jest średnio kilkunastokrotny (od 5 razy do ponad 70 razy). Najniższe spadki prędkości filtracji zarejestrowano dla etyliny, średnio dwukrotnie wyższe dla oleju napędowego, natomiast najwyższe dla migracji ropy z kopalni Grobla (około dwa razy wyższe niż dla oleju napędowego). Generalnie najmniej maleje wartość prędkości migracji węglowodorów z głębokością w FM1. W pozostałych fizycznych modelach gruntu spadek jest średnio dwukrotnie większy (pomijając przypadek migracji ropy z kopalni Grobla z powodu braku danych).

Przygotowując stanowisko pomiarowe, starano się równomiernie rozprowadzać kruszywo, ugniatając je równocześnie. Z tego powodu nie należy oczekiwać pojawienia się zróżnicowania przepuszczalności absolutnej z głębokością na etapie wykonania modelu gruntu. Ewentualne osadzanie kruszywa w okresie późniejszym, by mogło mieć istotny wpływ na zróżnicowanie właściwości filtracyjnych, powinno być zauważone przez obniżenie się powierzchni modelu. Zjawiska takiego jednak nie obserwowano.

3. ANALIZA WPŁYWU ZAWILGOCENIA GRUNTU NA PRĘDKOŚĆ FILTRACJI WĘGLOWODORÓW

Jedynym powodem, po stronie fizycznego modelu gruntu, obserwowanego wyraźnego spadku prędkości migracji węglowodorów z głębokością może być zróżnicowany profil zawilgocenia. Po przygotowaniu stanowiska pomiarowego oznaczono laboratoryjnie pierwotny profil zawilgocenia każdego modelu gruntu. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 2 [1]. Badanie polegało na pobraniu rdzenia o długości 10 cm, zważeniu go i powtórnym zważeniu po wygrzaniu w piecu w temperaturze 110°C. Następnie korzystając z wyników pomiaru gęstości objętościowej i porowatości, określono względne nasycenie przestrzeni porowej wodą S_w , zamieszczone w tabeli 2.

Tabela 2

Wyniki laboratoryjnego oznaczania profilu głębokościowego wilgotności FM

Lp.	Zakres głębokości [cm]	Średnia głębokość [cm]	Wilgotność gruntu S_w [%]		
			FM1	FM2	FM3
1	<0,10>	5	1,89	6,95	7,26
2	<10,20>	15	3,41	8,90	9,02
3	<20,30>	25	4,84	12,21	11,57
4	<30,40>	35	6,68	14,76	12,94
5	<40,50>	45	7,49	19,55	15,07
6	<50,60>	55	8,71	20,84	15,81
7	<60,70>	65	9,24	21,70	17,22
8	<70,80>	75	8,96	22,56	17,79
9	<80,90>	85	11,49	22,47	20,54
10	<90,100>	95	11,98	24,39	22,23
11	<100,110>	105	17,41	24,12	25,99
12	<110,120>	115	33,94	25,96	28,21

Zawilgocenie FM1 zmienia się od prawie 2% przy powierzchni do 34% na głębokości 115 cm. Wzrost S_w przy dnie komory jest spowodowany najprawdopodobniej wtórną filtracją wody po przygotowaniu modelu, dzięki dużej wartości współczynnika przepuszczalności. Zawilgocenie FM2 zmienia się od 7% przy powierzchni do 26% na dnie komory. W FM3 wartość S_w jest zbliżona w pierwszym interwale i o 2% większa w ostatnim. Podane wartości zawilgocenia modeli gruntu są średnimi określonymi w obrębie wydzielonych interwałów.

Obecność wody w przestrzeni porowej gruntu w strefie aeracji ujemnie wpływa na prędkość filtracji pionowej substancji ropopochodnej. Zwykle przyjmuje się, że zależność ta jest w przybliżeniu potęgowa [4], następującej postaci

$$v = K_f \cdot (1 - S_w)^b \quad (1)$$

gdzie:

- v – prędkość filtracji substancji ropopochodnej w strefie aeracji gruntu,
- K_f – współczynnik filtracji substancji ropopochodnej w strefie aeracji gruntu,
- b – potęga, zwykle przyjmuje się wartość 3.

Jeżeli zawilgocenie gruntu byłoby jedyną przyczyną zróżnicowania otrzymanych wartości prędkości filtracji pionowej badanych substancji ropopochodnych, to przekształcając równanie (1) ze względu na K_f i wstawiając v z tabeli 1 i S_w z tabeli 2, powinno się uzyskać zbliżone wartości współczynnika filtracji dla danego scenariusza (substancji ropopochodnej i modelu gruntu). Wyniki obliczeń K_f zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3

Ocena współczynnika filtracji dla poszczególnych scenariuszy eksperymentu

Substancja	ET	ET	ET	ON	ON	ON	RG	RG	RG	
Model gruntu	FM1	FM2	FM3	FM1	FM2	FM3	FM1	FM2	FM3	
Nr przypadku	Głębokość h_{sr} [cm]	Współczynnik filtracji K_f [mm/s]								
1	12,5	2,747	2,196	1,649	0,915	0,941	0,942	1,526	0,733	0,635
2	32,5	3,016	1,959	0,559	0,724	0,522	0,319	0,431	0,168	0,112
3	47,5	3,200	0,552	0,275	0,480	0,224	0,142	0,243	0,062	0,056
4	62,5	3,069	0,562	0,260	0,332	0,155	0,097	0,133	0,041	0,028
5	77,5	2,726	0,269	0,266	0,170	0,136	0,061	0,074	0,028	0,017
6	92,5	1,989	0,165	0,283	0,106	0,106	0,052	0,048	0,018	0,015
7	107,5	1,170	0,141	0,282	0,114	0,056	0,051	0,039	–	–

W tabeli 4 zamieszczono podstawowe statystyki opisowe ocen współczynnika filtracji odpowiadających każdemu z dziewięciu scenariuszy. W granicach przedziału ufności średniej dla $p = 95\%$, dla każdego scenariusza zanieczyszczenia nie mieści się co najmniej jedna obliczona wartość współczynnika filtracji. Poza pierwszym scenariuszem (ET, FM1), gdy tylko przypadek 7 leży poza przedziałem ufności średniej, dotyczy to zawsze przypadku 1 oraz dodatkowo przypadku 2 dla (ET, EM2) i (ON, FM1). W tej sytuacji można podejrzewać, że tak duże odchylenia wartości dla wymienionych przypadków są wynikiem występowania dodatkowego źródła błędów, poza fluktuacjami statystycznymi. Przypadków tych nie można jednak odrzucić, ponieważ ani razu nie jest spełniona zasada 3σ .

Tabela 4
Statystyki opisowe rozkładu wartości współczynnika filtracji

Substancja	ET	ET	ET	ON	ON	ON	RG	RG	RG
Model	FM1	FM2	FM3	FM1	FM2	FM3	FM1	FM2	FM3
Minimum	1,170	0,141	0,260	0,106	0,056	0,051	0,039	0,018	0,015
Średnia	2,560	0,835	0,511	0,406	0,306	0,248	0,356	0,175	0,144
Maksimum	3,200	2,196	1,649	0,915	0,941	0,942	1,526	0,733	0,635
Przedział ufności ($p = -95\%$)	1,885	0,032	0,036	0,113	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000
Przedział ufności ($p = +95\%$)	3,235	1,638	0,985	0,699	0,601	0,538	0,850	0,467	0,399
Wariancja	0,533	0,754	0,264	0,100	0,102	0,105	0,285	0,078	0,059
Odchylenie standardowe	0,730	0,868	0,513	0,317	0,319	0,325	0,534	0,278	0,243
Błąd standardowy	0,276	0,328	0,194	0,120	0,121	0,123	0,202	0,114	0,099

Chcąc bliżej poznać przyczyny rozbieżności uzyskanych wartości eksperymentalnych, zdecydowano się dokonać klasyfikacji przypadków metodą analizy skupień. Jej celem jest wyodrębnienie ze zbioru danych wartości podobnych do siebie i połączenie ich w grupy. W ten sposób z jednego niejednorodnego zbioru danych uzyskuje się pewną liczbę jednorodnych podzbiorów. Istnieje kilka różnych algorytmów klasyfikacji, pozwalających na przeprowadzenie analizy skupień. Do najważniejszych z nich należy metoda k -średnich oraz EM. Oba te algorytmy wykorzystano w dalszych rozważaniach.

Metoda k -średnich polega na zadaniu lub losowym wyborze k wartości, będących środkami grup. Pozostałe dane są przypisywane do takiej grupy, dla której od środka dzieli ją najmniejsza odległość. Po zakończeniu pojedynczej iteracji wyznaczane są nowe środki grup, będące średnią arytmetyczną wszystkich wartości zaliczonych do danej grupy (stąd nazwa algorytmu) i procedura klasyfikacji jest powtarzana.

Metoda EM oparta jest na wyznaczaniu skupienia wartości przy założeniu określonego rozkładu prawdopodobieństwa danych. Na początku zadaje się liczbę oczekiwanych skupień, które powinny być wyodrębnione ze zbioru wejściowego. Następnie dane są klasyfikowane tak, by ich rozkład w każdym podzbiorze odpowiadał pewnej wzorcowej krzywej prawdopodobieństwa rozkładu. Miarą jakości klasyfikacji jest poziom zgodności rozkładu danych empirycznych z krzywą wzorcową.

Wyniki klasyfikacji obliczonych wartości współczynnika filtracji zamieszczono w tabelach 5 i 6.

Tabela 5

Wyniki klasyfikacji wartości K_f metodą analizy skupień algorytmem k -średnich

Scenariusz	Nr przypadku	Wymuszenie 2 grupy		Wymuszenie 3 grupy		Sprawdzian krzyżowy	
		odległość	wynik	odległość	wynik	odległość	wynik
ET, FM1 (sprawdzian krzyżowy – 5 skupień)	1	0,101	2	0,005	2	0,005	1
	2	0,032	2	0,039	3	0,000	2
	3	0,122	2	0,052	3	0,000	3
	4	0,058	2	0,013	3	0,000	4
	5	0,111	2	0,005	2	0,005	1
	6	0,202	1	0,202	1	0,202	5
	7	0,202	1	0,202	1	0,202	5
ET, FM2 (sprawdzian krzyżowy – 2 skupienia)	1	0,058	1	0,000	1	0,058	1
	2	0,058	1	0,000	2	0,058	1
	3	0,104	2	0,104	3	0,104	2
	4	0,109	2	0,109	3	0,109	2
	5	0,034	2	0,034	3	0,034	2
	6	0,084	2	0,084	3	0,084	2
	7	0,096	2	0,096	3	0,096	2
ET, FM3 (sprawdzian krzyżowy – 3 skupienia)	1	0,000	1	0,000	1	0,000	1
	2	0,172	2	0,000	2	0,000	2
	3	0,033	2	0,001	3	0,001	3
	4	0,044	2	0,010	3	0,010	3
	5	0,039	2	0,005	3	0,005	3
	6	0,027	2	0,007	3	0,007	3
	7	0,028	2	0,006	3	0,006	3
ON, FM1 (sprawdzian krzyżowy – 2 skupienia)	1	0,118	1	0,000	1	0,118	1
	2	0,118	1	0,000	2	0,118	1
	3	0,296	2	0,296	3	0,296	2
	4	0,114	2	0,114	3	0,114	2
	5	0,087	2	0,087	3	0,087	2
	6	0,166	2	0,166	3	0,166	2
	7	0,157	2	0,157	3	0,157	2

Tabela 5 cd.

ON, FM2 (sprawdzian krzyżowy – 5 skupień)	1	0,000	1	0,000	1	0,000	1
	2	0,364	2	0,000	2	0,000	2
	3	0,028	2	0,101	3	0,000	3
	4	0,051	2	0,022	3	0,011	4
	5	0,073	2	0,000	3	0,011	4
	6	0,106	2	0,033	3	0,028	5
	7	0,162	2	0,089	3	0,028	5
ON, FM3 (sprawdzian krzyżowy – 5 skupień)	1	0,000	1	0,000	1	0,000	1
	2	0,223	2	0,000	2	0,000	2
	3	0,024	2	0,068	3	0,000	3
	4	0,026	2	0,018	3	0,000	4
	5	0,066	2	0,022	3	0,007	5
	6	0,077	2	0,032	3	0,003	5
	7	0,078	2	0,033	3	0,004	5
RG, FM1 (sprawdzian krzyżowy – 5 skupień)	1	0,000	1	0,000	1	0,000	1
	2	0,181	2	0,000	2	0,000	2
	3	0,055	2	0,091	3	0,000	3
	4	0,019	2	0,017	3	0,000	4
	5	0,059	2	0,023	3	0,013	5
	6	0,076	2	0,040	3	0,004	5
	7	0,082	2	0,046	3	0,010	5
RG, FM2 (sprawdzian krzyżowy – 3 skupienia)	1	0,000	1	0,000	1	0,000	1
	2	0,146	2	0,000	2	0,000	2
	3	0,001	2	0,035	3	0,035	3
	4	0,031	2	0,005	3	0,005	3
	5	0,050	2	0,013	3	0,013	3
	6	0,064	2	0,027	3	0,027	3
RG, FM3 (sprawdzian krzyżowy – 4 skupienia)	1	0,000	1	0,000	1	0,000	1
	2	0,107	2	0,000	2	0,000	2
	3	0,017	2	0,044	3	0,000	3
	4	0,028	2	0,002	3	0,013	4
	5	0,046	2	0,019	3	0,005	4
	6	0,050	2	0,023	3	0,008	4

Tabela 6

Wyniki klasyfikacji wartości K_j metodą analizy skupień algorytmem EM

Scenariusz	Nr przypadku	Wymuszenie 2 grupy		Wymuszenie 3 grupy		Sprawdzian krzyżowy	
		prawd.	wynik	prawd.	wynik	prawd.	wynik
ET, FM1 (sprawdzian krzyżowy – 3 skupienia)	1	0,991	2	0,881	3	0,881	3
	2	0,999	2	0,928	3	0,928	3
	3	1,000	2	0,849	3	0,849	3
	4	0,999	2	0,918	3	0,918	3
	5	0,988	2	0,867	3	0,867	3
	6	1,000	1	0,795	2	0,795	2
	7	1,000	1	0,626	1	0,626	1
ET, FM2 (sprawdzian krzyżowy – 2 skupienia)	1	1,000	2	1,000	3	1,000	2
	2	1,000	2	1,000	3	1,000	2
	3	1,000	1	0,996	1	1,000	1
	4	1,000	1	0,996	1	1,000	1
	5	1,000	1	0,997	1	1,000	1
	6	1,000	1	0,998	1	1,000	1
	7	1,000	1	0,998	1	1,000	1
ET, FM3 (sprawdzian krzyżowy – 5 skupień)	1	1,000	2	1,000	3	1,000	4
	2	0,651	1	0,392	1	0,768	2
	3	0,953	1	0,950	1	0,995	1
	4	0,950	1	0,948	1	0,987	1
	5	0,952	1	0,949	1	0,994	1
	6	0,955	1	0,951	1	0,992	1
	7	0,954	1	0,951	1	0,993	1
ON, FM1 (sprawdzian krzyżowy – 2 skupienia)	1	1,000	2	1,000	3	1,000	2
	2	0,988	2	1,000	3	0,988	2
	3	0,995	1	0,997	2	0,995	1
	4	1,000	1	1,000	2	1,000	1
	5	1,000	1	0,995	1	1,000	1
	6	1,000	1	1,000	1	1,000	1
	7	1,000	1	1,000	1	1,000	1

Tabela 6 cd.

ON, FM2 (sprawdzian krzyżowy – 2 skupienia)	1	1,000	2	1,000	3	1,000	2
	2	0,629	1	0,862	2	0,629	1
	3	0,939	1	0,905	1	0,939	1
	4	0,938	1	0,971	1	0,938	1
	5	0,935	1	0,973	1	0,935	1
	6	0,928	1	0,969	1	0,928	1
	7	0,910	1	0,929	1	0,910	1
ON, FM3 (sprawdzian krzyżowy – 4 skupienia)	1	1,000	2	1,000	3	0,995	4
	2	0,734	1	0,474	2	0,706	2
	3	0,961	1	0,927	1	0,801	1
	4	0,961	1	0,947	1	0,913	1
	5	0,954	1	0,948	1	0,926	1
	6	0,951	1	0,946	1	0,923	1
	7	0,951	1	0,946	1	0,922	1
RG, FM1 (sprawdzian krzyżowy – 3 skupienia)	1	1,000	2	1,000	3	1,000	3
	2	0,724	1	0,594	1	0,594	1
	3	0,935	1	0,901	1	0,901	1
	4	0,944	1	0,928	1	0,928	1
	5	0,934	1	0,922	1	0,922	1
	6	0,925	1	0,915	1	0,915	1
	7	0,921	1	0,912	1	0,912	1
RG, FM2 (sprawdzian krzyżowy – 3 skupienia)	1	1,000	2	1,000	3	1,000	3
	2	0,853	1	0,773	1	0,773	1
	3	0,974	1	0,964	1	0,964	1
	4	0,971	1	0,962	1	0,962	1
	5	0,967	1	0,958	1	0,958	1
	6	0,963	1	0,953	1	0,953	1
RG, FM3 (sprawdzian krzyżowy – 3 skupienia)	1	1,000	2	1,000	3	1,000	3
	2	0,912	1	0,884	1	0,884	1
	3	0,981	1	0,976	1	0,976	1
	4	0,980	1	0,975	1	0,975	1
	5	0,976	1	0,971	1	0,971	1
	6	0,975	1	0,969	1	0,969	1

Dla każdego algorytmu analizowano skupienia dla trzech przypadków:

- 1) wymuszając podział danych na dwie klasy,
- 2) wymuszając podział danych na trzy klasy,
- 3) poszukując najbardziej optymalnego podziału za pomocą ν -krotnego sprawdzianu krzyżowego.

W tej ostatniej sytuacji zadawano jedynie minimalną – 2 i maksymalną – 5 liczbę klas. W odniesieniu do analizy skupień algorytmem k -średnich w tabeli 5 podano „odległość” danej wartości od środka klasy oraz numer klasy, do której ją przydzielono („wynik”). Dla analizy skupień algorytmem EM (tab. 6) kolumna „wynik” zawiera identyczną informację, natomiast w kolumnie „prawd.” podano prawdopodobieństwo zdarzenia oznaczającego przynależność danej wartości do przydzielonej klasy. W pierwszej kolumnie tabel 5 i 6 w nawiasie podano liczbę klas, na jakie w pierwszej iteracji zostały podzielone dane w metodzie dopasowania sprawdzianem krzyżowym. Końcowy rezultat klasyfikacji może obejmować mniejszą liczbę skupień, na skutek przenoszenia pomiędzy nimi danych w kolejnych iteracjach. Poniższe obliczenia zrealizowano przy pomocy programu STATISTICA v. 7.1 StatSoft Inc.

Przedstawione wyniki klasyfikacji jednoznacznie pokazują, że gwałtowny spadek wraz z głębokością zmierzonej prędkości migracji substancji ropopochodnych w przygotowanych fizycznych modelach gruntu nie jest wywołany jedynie jego niejednorodnym zawilgoceniem. Dla każdego z rozważanych dziewięciu scenariuszy badań laboratoryjnych analiza skupień realizowana dwoma różnymi algorytmami dokonała podziału wartości współczynnika filtracji na co najmniej dwie klasy. Spośród zamieszczonych wyników 54 analiz skupień, tylko w dwóch przypadkach nie spełniają one postawionego założenia – wydzielone klasy nie są uporządkowane względem głębokości (scenariusz ET, FM1; analiza skupień algorytmem k -średnich – wymuszenie 3 grup i sprawdzian krzyżowy).

Dla scenariusza (ET, FM1) wydzielono jedną lub dwie klasy obejmujące dwie ostatnie wartości współczynnika filtracji (nr przypadku 6 i 7), odpowiadające najgłębiej zalegającym interwałom pomiarowym. W każdym z pozostałych scenariuszy wydzielona została jedna lub dwie klasy obejmujące dwie pierwsze wartości współczynnika K_f (nr przypadku 1 i 2), odpowiadające naj płytszym rozważanym interwałom pomiarowym. Dla czterech scenariuszy: (ON, FM2), (ON, FM3), (RG, FM1), (RG, FM3) analiza skupień algorytmem k -średnich wydzieliła równocześnie oba rodzaje wymienionych klas, odpowiadających naj płytszym i najgłębszym interwałom pomiarowym. Generalnie można stwierdzić, że na uzyskane wyniki prędkości migracji istotny wpływ mają pewne, nieuwzględnione do tej pory w rozważaniach czynniki. Objawiają się one w początkowym okresie migracji (dla głębokości 0÷40 cm) oraz pod koniec jej trwania (dla głębokości 85÷115 cm).

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza zmienności z głębokością prędkości filtracji pionowej wybranych substancji ropopochodnych w przygotowanych fizycznych modelach gruntu pozwoliła jednoznacznie stwierdzić, że zmienny profil zawilgocenia pierwotnego gruntu jest dominującym, ale nie jedynym jej powodem. Uwidaczniają się w sposób jednoznaczny do-

datkowe czynniki na początku trwania migracji (dla 8 scenariuszy na 9 rozważanych) oraz w jej końcowym okresie (dla 4 scenariuszy na 9 rozważanych dla analizy skupień algorytmem k -średnich; analiza skupień algorytmem EM nie wskazuje na taką tendencję).

Najbardziej prawdopodobny sposób wytłumaczenia zaistniałej sytuacji wydaje się być następujący:

- Wartości eksperymentalne prędkości migracji pionowej substancji ropopochodnej w gruncie dotyczące małych głębokości (0÷40 cm) wydają się zawyżone. Powód tego stanu rzeczy związany jest ze sposobem wprowadzania zanieczyszczenia do systemu. Węglowodory wylewano z kanistra nad powierzchnią modelu gruntu z pewną prędkością początkową, która ułatwiała ich wnikanie do wnętrza gruntu w początkowym okresie, aż do ich wyhamowania.
- Wartości eksperymentalne prędkości migracji pionowej substancji ropopochodnej w gruncie dotyczące dużych głębokości (85÷115 cm) wydają się niższe, niż wynikałoby to z założonego poziomu zawilgocenia gruntu. W tym interwale głębokości zawilgocenie gruntu zmienia się gwałtownie (tab. 2), skąd można podejrzewać, że jego poziom na końcach 10 cm odcinka pomiarowego znacznie się różni. W rozważaniach operowano jednak wartością uśrednioną wilgotności, niższą od maksymalnej. Sytuacja ta w zestawieniu z nieliniową zależnością prędkości filtracji od zawilgocenia (1) tłumaczy zaobserwowane rozbieżności.

LITERATURA

- [1] Fąfara Z.: *Badanie procesu migracji substancji ropopochodnych w ośrodku gruntowo-wodnym*. Kraków, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH 2007 (monografia habilitacyjna, w druku)
- [2] Fąfara Z., Jewulski J., Kaszycki P., Kołoczek H., Rychlicki S., Solecki T., Stopa J., Twardowski K., Wojnarowski P., Zagrajczuk D.: *Metody usuwania zanieczyszczeń węglowodorowych ze środowiska gruntowo-wodnego*. Praca zespołowa pod redakcją S. Rychlickiego. Kraków, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH 2006
- [3] Fąfara Z., Rychlicki S.: *Wpływ właściwości gruntu na migrację węglowodorów na podstawie badań laboratoryjnych*. Rocznik Wiertnictwo Nafta Gaz, 22/1, 2005, 135–143
- [4] Schüth F., Sing K.S., Weitkamp J.: *Handbook of Porous Solids*. Wiley-Vch, vol. 4, Weinheim, Niemcy 2002