

## WYZNACZANIE OBJĘTOŚCI PRODUKTU ROPOPOCHODNEGO PŁYWAJĄCEGO PO ZWIERCIADLE WÓD GRUNTOWYCH ZA POMOCĄ MODELOWANIA NUMERYCZNEGO PROGRAMEM MARS

### DETERMINATION OF THE VOLUME OF OIL FLOATING ON THE WATER TABLE USING NUMERIC MODELLING BY THE MARS COMPUTER SOFTWARE

ZBIGNIEW KACZOROWSKI<sup>1</sup>, TOMASZ KASELA<sup>2</sup>

**Abstrakt.** W artykule przedstawiono sposób obliczania objętości substancji ropopochodnych na zwierciadle wód gruntowych za pomocą modelowania numerycznego programem MARS (Multiphase Areal Remediation Simulator). Omówiono parametry fizyczne gruntu, wody i produktu ropopochodnego oraz ich wpływ na obliczenia. Poza parametrami gruntu, dla oszacowania objętości produktu ropopochodnego najważniejsza jest znajomość gęstości cieczy.

**Słowa kluczowe:** produkty ropopochodne, modelowanie, przepływ wielofazowy, zanieczyszczenie środowiska gruntowo-wodnego.

**Abstract.** The paper presents how to determine the volume of oil floating on the groundwater table, using numerical modelling by the MARS (Multiphase Areal Remediation Simulator) computer software. Physical parameters of the ground, water and oil, as well their effect on the determinations are given. Besides the ground parameters, density of the liquid must be calculated to estimate the volume of oil.

**Key words:** oil, modelling, multiphase flow, environmental pollution.

### MODEL FILTRACJI WIELOFAZOWEJ MARS

Na skutek złego gospodarowania substancjami ropopochodnymi lub/i awarii w obiektach magazynowania i dystrybucji tych produktów dochodzi do zanieczyszczenia środowiska gruntowo-wodnego. Długotrwały proces zanieczyszczenia może doprowadzić do powstania wielohektarowych plam produktów ropopochodnych (NAPL – Non-Aqueous Phase Liquid) pływających na zwierciadle wód pierwszego poziomu wodonośnego, o miąższości dochodzącej nawet do kilku metrów (mierzonej w otworach monitoringowych). Dla wyboru sposobu rekultywacji i określenia czasu jej trwania duże znaczenie ma oszacowanie objętości plamy.

Jednym z narzędzi przeznaczonych do obliczania objętości plam produktów ropopochodnych, symulacji procesu sczerpywania plam jest program MARS (Multiphase Areal

Remediation Simulator) autorstwa Draper Aden Environmental Modeling Inc. (1997). Program jest oparty na algorytmie rozwiązywania równań metodą elementów skończonych. Daje to możliwość konstrukcji nieregularnej, sześciobocznej siatki dyskretyzacyjnej modeli. Ze względu na specyfikę rozwiązań (transport cieczy wielofazowej) modele są jednowarstwowe dla swobodnego zwierciadła cieczy. Powierzchniami spągu i stropu modelu są odpowiednio powierzchnia spągu warstwy zawodnionej i powierzchnia zwierciadła cieczy. Wyróżnia się dwie powierzchnie cieczy: powierzchnię na granicy powietrze/ropopochodne  $H_{ao}$  (air/oil) i powierzchnię na granicy ropopochodne/woda  $H_{ow}$  (oil/water).

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny, Oddział Górnośląski, ul. Królowej Jadwigi 1, 41-200 Sosnowiec; zbigniew.kaczorowski@pgi.gov.pl

<sup>2</sup> Hydrogeotechnika Sp. z o.o., ul. Ściegiennego 262a, 25-116 Kielce; tomasz.kasela@hydrogeotechnika.pl

Do rozwiązywania modeli filtracji wody podstawowymi parametrami hydrogeologicznymi są: współczynnik filtracji  $k$  i dla warunków nieustalonych porowatość  $n$  oraz odsączalność warstwy wodonośnej  $\mu$ . Dla modeli filtracji wielofazowej dodatkowymi parametrami są wielkości opisujące stopień nasycenia porów cieczą:  $S$ ,  $S_m$ ,  $S_{or}$ ,  $S_{og}$  i parametry modelu gruntu wg van Genuchtena  $\alpha$ ,  $n$ .  $S$  jest stopniem nasycenia porów gruntu cieczą, a jego wartość może wahać się od 0 (dla całkowicie wysuszonej strefy aeracji) do 1 (dla strefy saturacji). W przypadku gdy medium wypełniające pory jest wielofazowe, dla różnych faz i stref gruntu możemy wyróżnić inne rodzaje stopnia nasycenia porów cieczą:  $S_m$  – rezydualne nasycenie porów wodą,  $S_{or}$  – maksymalne rezydualne nasycenie porów ropopochodnymi w strefie saturacji,  $S_{og}$  – maksymalne rezydualne nasycenie porów ropopochodnymi w strefie aeracji. Parametry te charakteryzują grunt pod względem jego zdolności do przyjmowania cieczy w przestrzeni porowej. Ma to duże znaczenie w przypadku wahań zwierciadła wody, gdyż każde obniżenie i wznios zwierciadła cieczy powoduje uwięzienie w przestrzeni porów części ropopochodnych pływających na powierzchni. Parametrem charakteryzującym rozkład wielkości porów jest  $n$ ;  $\alpha$  natomiast jest parametrem zależnym od wysokości strefy wzniosu kapilarnego. Wartości  $n$  wzrastają wraz ze wzrostem rozmiarów ziarn skały – od 1,00–1,09 (dla ilów) do 4,00 (dla żwirów). Parametr  $\alpha$  [ $m^{-1}$ ] również wzrasta wraz ze wzrostem rozmiarów ziarn skały. Dla ilów wynosi 0,50–1,00  $m^{-1}$ , a dla żwirów 20,0–50,0  $m^{-1}$ .

Dodatkowo w modelach filtracji wielofazowej muszą być uwzględnione parametry charakteryzujące fazy ciekłe (gęstość i lepkość):  $\rho_{ro}$  – stosunek gęstości ropopochodnych do gęstości wody,  $\eta_{ro}$  – stosunek lepkości dynamicznej ropopochodnych do lepkości wody,  $\beta_{ao}$  – parametr skalujący powietrze – ropopochodne, będący stosunkiem napięć powierzchniowych wody i ropopochodnych,  $\beta_{ow}$  – parametr skalujący ropopochodne–woda, będący stosunkiem napięcia

powierzchniowego wody i międzyfazowego pomiędzy wodą a ropopochodnymi. Dla substancji o bardzo małej rozpuszczalności parametry skalujące można wyrazić jako funkcje gęstości:

$$\beta_{ao} = \frac{1}{0,5 \rho_{ro}} \quad [1]$$

$$\beta_{ow} = 2\rho_{ro} \quad [2]$$

Występowanie dwóch faz ciekłych powoduje, że w modelu występują odrębne warunki brzegowe dla tych faz. Warunki I rodzaju: dla wody – stała wysokość  $H_{ow}$  w kroku czasowym, dla ropopochodnych – stała wysokość  $H_{ao}$  w kroku czasowym. Warunki II rodzaju: dla wody – stały wydatek wody – pobór/zatłaczanie w kroku czasowym, dla ropopochodnych – stały wydatek ropopochodnych – szczyptywanie/iniekcja w kroku czasowym. Pozwala to na wielowariantowe symulacje procesów zanieczyszczania i oczyszczania poziomu wodonośnego.

Jako wyniki symulacji otrzymujemy dane o objętości wody, produktów ropopochodnych wolnych i produktów ropopochodnych uwięzionych w porach (w strefie aeracji i saturacji) w modelowanym obszarze oraz mapy rozkładu zwierciadła wody (powierzchni  $H_{ow}$  i wartości sprowadzonego ciśnienia wody), miąższości produktów ropopochodnych i miąższości produktów ropopochodnych uwięzionych w porach (w strefie aeracji i saturacji) w poszczególnych krokach czasowych rozwiązania. Jako miąższość ropopochodnych jest przyjmowana objętość jednostkowa ropopochodnych przypadająca na obszar przylegający do węzła obliczeniowego. Dane te umożliwiają na drodze porównań kolejnych wariantów rozwiązań dobór optymalnego rozkładu otworów eksploatacyjnych (do szczyptywania wody i/lub ropopochodnych) i doboru ich wydajności, co przyczynia się do optymalizacji procesu i redukcji czasu oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego.

## OBLICZENIA OBJĘTOŚCI PLAMY

Jako przykład zastosowania programu MARS do obliczenia objętości produktu ropopochodnego pływającego na zwierciadle wód gruntowych wybrano obszar byłego lotniska w Kluczewie, rejon Centralnej Stacji Tankowania (CST). Modelowaniem objęto obszar  $500 \times 600$  m. Zdyskretyzowano go siatką prostokątną o bokach  $10 \times 12$  m ( $51 \times 51$  węzłów). Przyjęto, że spąg warstwy wodonośnej występuje na rzędnej 15 m n.p.m. i stanowi go warstwa glin (Kasela i in., 1996). Strop warstwy wodonośnej stanowiła powierzchnia zwierciadła cieczy, która wg danych z maja 2003 r. kształtowała się na rzędnych od 24,1 do 24,57 m n.p.m. (Kaczorowski, Kasela, 2003). W obrębie CST poziom wodonośny zbudowany jest głównie z piasków średnio- i drobnziarnistych oraz lokalnie występujących piasków gliniastych i różnoziarnistych.

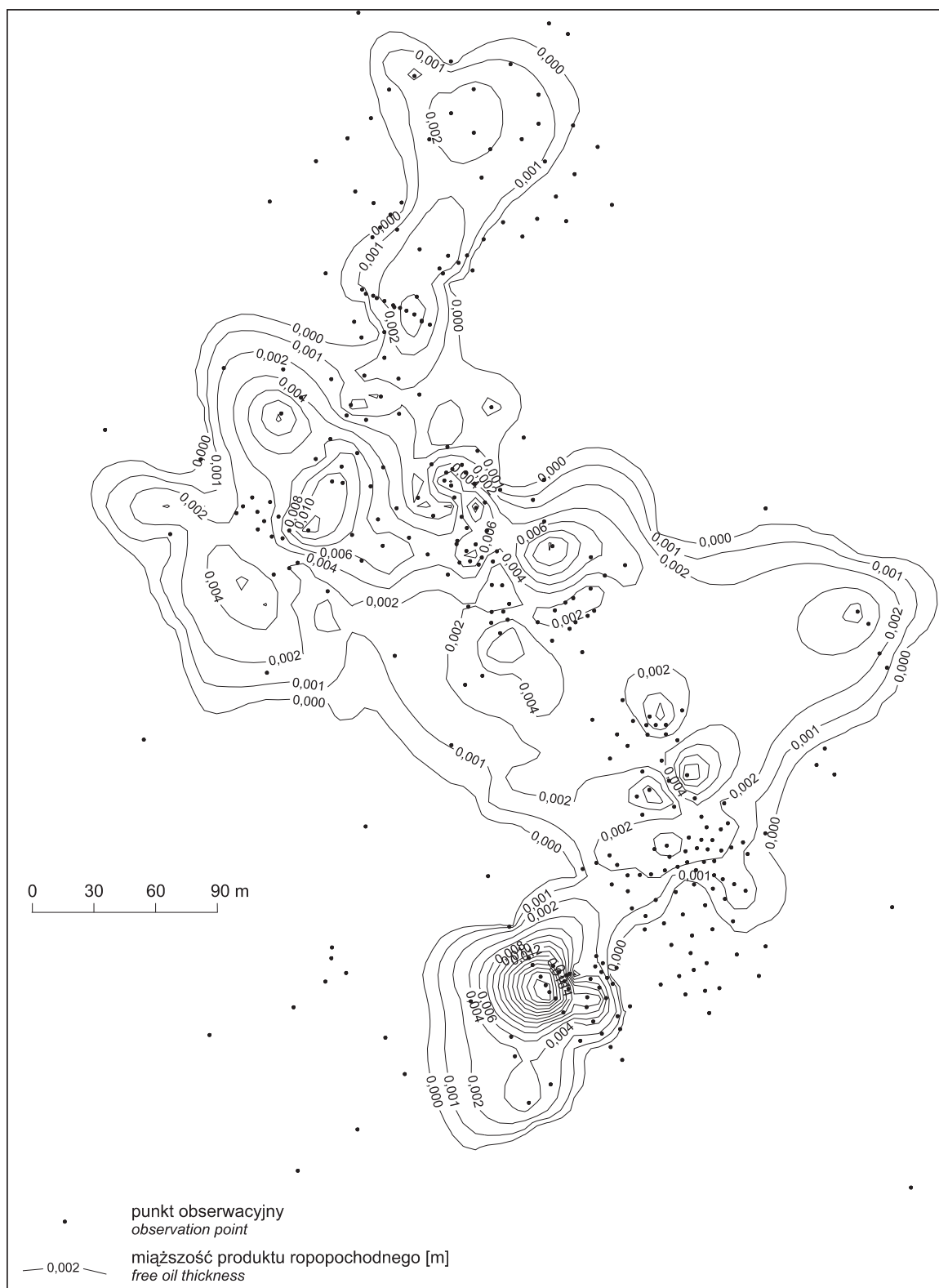
Podczas procesu kalibracji modelu oszacowano parametry gruntu:  $k$  0,7–10,0 m/d; porowatość całkowita 41–43%;

$S_m$  0,1–0,25;  $S_{or}$  0,21–0,28;  $S_{og}$  0,03–0,055;  $\alpha$  6,5–14,5;  $n$  1,55–2,3;  $h$  – wysokość wzniosu kapilarnego 1,5 m.

Na obszarze byłego lotniska w Kluczewie na zwierciadle wód gruntowych zalegał produkt ropopochodnych o właściwościach odpowiadających paliwom typu PS-2 do turbiniowych silników lotniczych (Kasela i in., 1996). Do modelu przyjęto następujące parametry produktu ropopochodnego:  $\eta_{ro}$  – 0,9;  $\rho_{ro}$  – 0,784;  $\beta_{ao}$  – 2,76;  $\beta_{ow}$  – 1,568.

Dla obserwowanej miąższości w otworach obserwacyjnych i eksploatacyjnych, wynoszącej od 0 (brak ropopochodnych na zwierciadle wody) do 0,11 m, oszacowana objętość ropopochodnych wynosiła 306,19  $m^3$ . Miąższość wolnego produktu ropopochodnego wyliczona programem MARS wynosiła od 0,000 do 0,026 m, a jej rozkład przedstawiono na figurze 1.

W celu ilustracji wpływu lepkości i gęstości cieczy oraz wysokości strefy wzniosu kapilarnego na objętość ropopo-



**Fig. 1. Mapa rozkładu miąższości wolnego produktu ropopochodnego**

Map of free oil thickness distribution

Tabela 1

## Wartości parametrów ropopochodnych przyjęte do obliczeń

Oil parameters for analyses

Zmiana parametru [%]	$\eta_{ro}$	$\rho_{ro}$	$\beta_{ao}$	$\beta_{ow}$	h
5,0	0,945	0,823	2,547	1,646	1,575
2,5	0,923	0,804	2,647	1,607	1,538
1,0	0,909	0,792	2,713	1,584	1,515
0,0	0,900	0,784	2,761	1,568	1,500
-1,0	0,891	0,776	2,811	1,552	1,485
-2,5	0,878	0,764	2,891	1,529	1,463
-5,0	0,855	0,745	3,042	1,490	1,425

Tabela 2

## Objętość ropopochodnych w zależności od wartości parametrów ropopochodnych

Volume of oil versus values of oil parameters

Zmiana parametru [%]	$\eta_{ro}$	$\eta_{ro} - \%$ przyjętej objętości	$\rho_{ro}$	$\rho_{ro} - \%$ przyjętej objętości	h	h - % przyjętej objętości
5,0	306,19	100,0	271,74	88,7	307,14	100,3
2,5	306,19	100,0	289,71	94,6	306,77	100,2
1,0	306,19	100,0	299,21	97,7	306,25	100,0
0,0	306,19	100,0	306,19	100,0	306,19	100,0
-1,0	306,19	100,0	311,89	101,9	306,39	100,1
-2,5	306,19	100,0	321,38	105,0	308,67	100,8
-5,0	306,19	100,0	333,28	108,8	310,58	101,4

chodnych przeprowadzono obliczenia przy zmianie powyższych parametrów o  $\pm 1$ , 2,5 oraz 5% wartości przyjętej do obliczeń (tab. 1). Obliczenia wykonywano zmieniając wybrany parametr, inne pozostawiając niezmiennymi. W przypadku gęstości, jej zmiana pociągała za sobą zmianę parametrów skalujących  $\beta_{ao}$  i  $\beta_{ow}$ . Podczas obliczeń przy zmianie gęstości zmieniano również wartości tych parametrów skalujących. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

Obliczenia wykazały, że zmiana lepkości nie uwidacznia się w zmianie objętości ropopochodnych pływających na zwierciadle wód. Duże znaczenie dla szacowania objętości

ropopochodnych ma natomiast gęstość, ponieważ wpływa na dwa inne parametry. Zmniejszenie gęstości o 5% spowodowało zwiększenie objętości o 8,8%, natomiast zwiększenie gęstości o 5% spowodowało zmniejszenie objętości o 11%. W przypadku zmian gęstości o 2,5% następują zmiany objętości rzędu 5%, a przypadku zmian gęstości o 1% następują zmiany objętości rzędu 2%.

Nieznaczny wpływ na zmiany obliczanej objętości ropopochodnych mają zmiany wysokości strefy wzniosu kapilarnego; 5% zmiana parametru powoduje zmianę objętości o 1,4%.

## PODSUMOWANIE

Użycie modelu matematycznego do obliczania objętości ropopochodnych umożliwia uwzględnienie rodzaju osadów (współczynnik filtracji, porowatość, rozkład porowatości, wysokość wzniosu kapilarnego), parametrów cieczy (lepkość, gęstość) oraz ich przestrzennej zmienności.

Przy dużym zróżnicowaniu ropopochodnych występujących w badanym obszarze (ropopochodne o różnych gę-

stościach) modelowanie pozwala oszacować przedział, w jakim może znajdować się poszukiwana wartość objętości.

Objętość ropopochodnych pływających na zwierciadle wody jest wartością chwilową, obliczaną dla danego czasu, ściśle zależną od położenia zwierciadła cieczy i od bezpośrednio poprzedzających stanów cieczy w poziomie wodonośnym.

## LITERATURA

- DRAPER Aden Environmental Modeling Inc., 1997 – Technical documentation and user guide – multiphase areal remediation simulator. Blacksburg.
- KASELA T., FABROWSKA E., RYBKA A., 1996 – Dokumentacja geologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z magazynowaniem i dystrybucją paliw na byłym lotnisku Kluczewo wraz z oceną oddziaływania zanieczyszczeń produktami

- ropopochodnymi na środowisko gruntowo-wodne. Arch. Exbud-Hydrogeotechnika Sp. z o.o., Kielce.
- KACZOROWSKI Z., KASELA T., 2003 – Aktualizacja modeli filtracji wielofazowej dla bazy A, B, CST oraz rurociągu przesyłowego. Arch. Exbud-Hydrogeotechnika Sp. z o.o., Kielce.