

Iwona DESKA¹ i Katarzyna ŁACISZ¹

MOŻLIWOŚCI ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ LEKKICH CIECZY ORGANICZNYCH W OŚRODKU POROWATYM O BUDOWIE WARSTWOWEJ

THE POSSIBILITY OF THE LIGHT NON-AQUEOUS PHASE LIQUIDS MIGRATION IN THE LAYERED POROUS MEDIUM

Abstrakt: Lekkie ciecz organiczne niemieszające się z wodą (LNAPL), dostające się do środowiska wodno-gruntowego, stanowią dla niego bardzo poważne zagrożenie. W przypadku występowania warstwy LNAPL na zwierciadle wody podziemnej pierwszy etap remediacji powinno stanowić jej szczypanie. W celu prawidłowego zaprojektowania i monitorowania operacji szczypania niezbędna jest znajomość rzeczywistej miąższości LNAPL lub jednostkowej objętości LNAPL, które ustala się na podstawie miąższości zmierzonej w studni obserwacyjnej (tzw. miąższości pozornej). Miąższość pozorna może być nawet kilka razy wyższa od miąższości rzeczywistej, a różnica między nimi zależy od właściwości gruntu oraz właściwości i ilości LNAPL na zwierciadle wody podziemnej. Celem badań prowadzonych w ramach niniejszej pracy było ustalenie, czy na skutek obecności LNAPL w otworze obserwacyjnym może dojść do wtórnego zanieczyszczenia warstw dobrze przepuszczalnych położonych poniżej plamy LNAPL na zwierciadle wody w ośrodku porowatym o budowie warstwowej. Otrzymane wyniki wskazują, że znaczna część LNAPL może przedostawać się ze studni do warstwy o wysokiej przepuszczalności, jeżeli znajdują się one w hydraulicznym kontakcie. Dodatkowo, infiltracja LNAPL do warstwy dobrze przepuszczalnej wpływa na zmianę wartości miąższości pozornej, co może komplikować prawidłowe ustalenie miąższości rzeczywistej lub jednostkowej objętości LNAPL na zwierciadle wody podziemnej.

Słowa kluczowe: LNAPL, miąższość rzeczywista, miąższość pozorna, otwór obserwacyjny, ośrodek porowaty o budowie warstwowej

Substancje ropopochodne (SR) dostają się do środowiska gruntowo-wodnego m.in. na skutek awarii rurociągów i cystern transportujących paliwa, w wyniku wycieków ze zbiorników magazynujących paliwa [1]. Niewielka ich ilość może przesączać się do gruntów i wód podziemnych wraz z odciekami z nieprawidłowo zabezpieczonych składowisk odpadów [2] oraz na skutek eksploatacji złóż paliw kopalnych [3].

Szczególne zagrożenie dla gruntów i wód podziemnych stanowią lekkie ciecz organiczne niemieszające się z wodą (LNAPL), które, z uwagi na swoje właściwości, mogą unosić się na powierzchni zwierciadła wody podziemnej i przemieszczać się w ośrodku porowatym zgodnie z kierunkiem filtracji wód podziemnych [1]. Grunt, przez który przemieściła się plama LNAPL, zostaje zanieczyszczony rezydualną (resztkową) frakcją cieczy organicznej, która ma postać pojedynczych kropli uwieczonych pomiędzy ziarnami gruntu, współwystępujących w porach wraz z wodą oraz powietrzem porowym [4].

Zarówno mobilna LNAPL, jak i znajdująca się w fazie rezydualnej (niemobilnej, nieciągłej) stanowią źródło wtórnego zanieczyszczenia warstwy wodonośnej rozpuszczalnymi frakcjami produktów ropopochodnych [5]. Szczególne zagrożenie

¹ Instytut Inżynierii Środowiska, Politechnika Częstochowska, ul. Brzeźnicka 60A, 42-200 Częstochowa, tel. 34 325 09 17, email: ideska@is.pcz.czest.pl

* Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'14, Jarnołtówek, 15-17.10.2014

stanowią substancje o wysokiej rozpuszczalności, ale również substancje słabo rozpuszczalne w wodzie, np. wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), w określonych warunkach mogą być wymywane z zanieczyszczonego gruntu i dostawać się do wód podziemnych [6]. Bezpośrednie skażenie zasobów wodnych nie jest jedynym skutkiem obecności SR w środowisku wodno-gruntowym. Substancje te mogą bowiem niekorzystnie zmieniać pierwotne właściwości izolacyjne gruntów spoistych, tworzących naturalne bariery ochronne dla zbiorników wód podziemnych, co może w konsekwencji prowadzić do wtórnego zanieczyszczenia zasobów wodnych [7]. Obecność SR w ośrodku porowatym prowadzi nie tylko do zmian morfologii gruntu, ale również do zakłócenia przebiegu procesów biologicznych na skutek skażenia związkami toksycznymi [8].

W przypadku zanieczyszczenia warstwy wodonośnej substancjami ropopochodnymi należy niezwłocznie przystąpić do akcji mającej na celu zaprojektowanie i przeprowadzenie remediacji gruntu i wód podziemnych [9]. W przypadku obecności LNAPL na zwierciadle wody podziemnej wstępny etap remediacji powinien polegać na jej szczypaniu. Dopiero po usunięciu wolnej, mobilnej fazy LNAPL można przystąpić do właściwej remediacji, prowadzonej za pomocą metod wykorzystujących procesy fizyczne, fizykochemiczne lub biologiczne [10]. Prawidłowe zaprojektowanie procesu szczypania wymaga znajomości zasięgu plamy zanieczyszczenia, zarówno miąższości, jak i poziomego rozprzestrzenienia. Prowadzone badania mają też na celu ustalenie, czy plama zanieczyszczenia jest mobilna, czy rozprzestrzenia się na zwierciadle wody podziemnej i jaki jest kierunek jej migracji [9].

Badania zasięgu i migracji plamy LNAPL bardzo często są prowadzone z zastosowaniem otworów obserwacyjnych odwierconych w zanieczyszczonej warstwie wodonośnej [9]. Na podstawie pomiaru miąższości warstwy LNAPL w otworach obserwacyjnych (tzw. miąższości pozornej LNAPL) oraz odpowiednich właściwości gruntu i LNAPL można ustalać miąższość wolnego produktu na zwierciadle wody podziemnej w ośrodku porowatym (tzw. miąższość rzeczywistą) [11, 12] lub jednostkową objętość LNAPL [13-15].

Określenie miąższość rzeczywistą, zgodnie z modelem rozwiniętym w latach 80. XX wieku (tzw. modelem „Pancake”), oznacza miąższość tej strefy gruntu, w której w przestrzeni porowej występuje LNAPL [16]. Model ten wprowadza uproszczenie, że LNAPL na zwierciadle wody tworzy ciągłą warstwę, w której prawie 100% porów wypełnionych jest cieczą organiczną. Tymczasem, oprócz LNAPL, w porach strefy zanieczyszczonej występuje także pewna ilość wody oraz powietrza. W związku z tym objętość cieczy organicznej ustalona w oparciu o ten model jest zazwyczaj zawyżona [15, 16]. Poza tym, z uwagi na niejednorodność ośrodka porowatego i zachodzące w nim zjawiska kapilarne, dolna granica strefy gruntu zanieczyszczonego LNAPL zazwyczaj nigdy nie przebiega idealnie poziomo i często jest dość nieregularna. Niemniej jednak, określanie miąższości pozornej może być przydatne do wstępnego, przybliżonego oszacowania miąższości i głębokości zalegania zanieczyszczonego gruntu oraz wstępnego ustalenia wysokości profilu nasycenia gruntu substancją ropopochodną [17].

Bardziej dokładnie zachowanie LNAPL w ośrodku wodno-gruntowym opisuje model opracowany w latach 90. ubiegłego stulecia - tzw. model wielofazowy (ang. *multiphase model*) [14-16]. W modelu tym brany jest pod uwagę fakt, że w strefie gruntu zanieczyszczonej produktem ropopochodnym, obok LNAPL, w przestrzeni porowej

występują także woda i powietrze. Stopień nasycenia ośrodka gruntowego LNAPL w zasadzie nigdy nie osiąga 100% i przeważnie zawiera się w przedziale od 5 do ok. 70% [14, 16]. Nasycenie to w profilu glebowym strefy zanieczyszczonej przyjmuje zróżnicowane wartości w zależności od wysokości położenia danego punktu względem rzędnej zwierciadła wody oraz usytuowania warstwy LNAPL w otworze obserwacyjnym. Najwyższy stopień nasycenia LNAPL obserwuje się w bezpośrednim sąsiedztwie zwierciadła wody [13, 16]. Zgodnie z modelem wielofazowym, to nie miąższość rzeczywista, ale tzw. jednostkowa objętość LNAPL (ang. *LNAPL specific volume*) pozwala na bardziej precyzyjne oszacowanie objętości substancji ropopochodnej, jaka może zostać sczerpana z ośrodka wodno-gruntowego w ramach remediacji wstępnej [14]. Objętość jednostkowa jest to objętość LNAPL przypadająca na jednostkę powierzchni zwierciadła wody. Ma ona wymiar liniowy i jest jednoznaczna z wysokością słupa LNAPL w profilu gruntowym, jaka pozostałaby w przypadku usunięcia gruntu, wody i powietrza [14, 15]. Objętość jednostkowa jest określana przy zastosowaniu zróżnicowanych metod, w których podstawowym parametrem są: miąższość pozorna LNAPL, właściwości LNAPL oraz krzywe zależności między ciśnieniem kapilarnym a nasyceniem gruntu płynami - LNAPL, wodą oraz powietrzem [13-16]. Wartość objętości jednostkowej jest zawsze mniejsza niż miąższości rzeczywistej [14].

Zarówno obliczenie miąższości rzeczywistej, jak i jednostkowej objętości LNAPL wymaga określenia miąższości pozornej LNAPL [16]. Miąższość pozorna może być nawet kilka razy większa od rzeczywistej, a dolna granica warstwy LNAPL w studni pojawia się zazwyczaj znacznie niżej niż dolna granica występowania zanieczyszczenia ropopochodnego w warstwie wodonośnej [12, 14, 18, 19]. W związku z tym otwory obserwacyjne, w których ma być widoczna cała miąższość pozorna LNAPL (od granicy rozdziału faz powietrze-LNAPL do granicy rozdziału faz LNAPL-woda w studni), muszą mieć odpowiednio dużą głębokość.

Należy jednak podkreślić, że pojawienie się warstwy LNAPL w studni obserwacyjnej może być efektem nie tylko obecności cieczy organicznej na zwierciadle wody podziemnej, ale również jej obecności w makroporach (szczelinach, pęknięciach), zlokalizowanych pod zwierciadłem wody podziemnej, pozostających w kontakcie hydraulicznym z soczewką LNAPL na zwierciadle wody [20]. Może dojść do sytuacji, w której, mimo zlokalizowania warstwy LNAPL w otworze obserwacyjnym, jedynie niewielka ilość cieczy organicznej będzie obecna na powierzchni swobodnego zwierciadła wody, a większość znajdzie się w warstwie utworów dobrze przepuszczalnych, zlokalizowanej pod zwierciadłem wody, mającej kontakt z soczewką LNAPL (tzw. napięta LNAPL) [20, 21].

Eksperyment scharakteryzowany w niniejszym artykule ma na celu zbadanie, jak zachowuje się LNAPL obecna w otworze obserwacyjnym, gdy otwór ten odwiercony jest w niejednorodnym ośrodku wodno-gruntowym o budowie warstwowej, w którym pomiędzy warstwami o niższej przepuszczalności występują warstwy o bardzo wysokiej przepuszczalności. Celem badań jest także ustalenie, czy w takiej sytuacji może dojść do wtórnego zanieczyszczenia warstw słabiej przepuszczalnych położonych powyżej warstw dobrze przepuszczalnych zanieczyszczonych LNAPL. Innym celem przeprowadzonych badań jest określenie, czy kontakt warstw dobrze przepuszczalnych z LNAPL, obecną w otworze obserwacyjnym, może wpłynąć na miąższość pozorną, a tym samym na oszacowanie objętości LNAPL możliwej do sczerpania.

Metodyka badań

Badania możliwości rozprzestrzeniania LNAPL były prowadzone z zastosowaniem 3 rodzajów gruntów, w tym 2 typów gruntów piaszczystych, których właściwości podano w tabeli 1, i jednego rodzaju żwiru, stanowiącego warstwę o wysokiej przepuszczalności. W skład żwiru wchodziły ziarna o średnicach od 5 do 20 mm. Jako LNAPL zastosowano olej rzepakowy o gęstości $\rho = 918 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ i lepkości dynamicznej $\mu = 0,07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (w temperaturze 20°C).

Właściwości gruntów zastosowanych w badaniach

Tabela 1

Properties of soils used in the experiments

Table 1

Grunt	Rodzaj gruntu	Średnica miarodajna d_{10} [mm]	Współczynnik nierównomierności uziarnienia wg Hazena U [-]	Współczynnik filtracji w temperaturze 10°C k_{10} [m/d]
1	piasek	0,20	1,25	12,8
2	piasek	0,19	1,58	13,1

Badania prowadzono w wyskalowanej kolumnie z plexiglasu o średnicy wewnętrznej 10 cm i długości ok. 70 cm. W kolumnie, przy ścianie, została wbudowana studnia obserwacyjna o przekroju półkolistym i średnicy 3,5 cm, zafiltrowana na całej długości, o rozmiarze oczek filtra 0,5 cm. Ścianka studni została zabezpieczona włókniną filtracyjną, aby ziarna gruntu nie przesywały się do wnętrza otworu. W kolumnie badawczej została wbudowana kolumna wyrównawcza zafiltrowana od dołu, o średnicy 3 cm, której zadaniem było wyrównywanie poziomów płynów w układzie badawczym. Kolumna została wypełniona naprzemiennie układanymi warstwami gruntów 1, 2 oraz żwiru. Warstwy zostały umieszczone w przybliżeniu na następujących głębokościach, licząc od poziomu powierzchni gruntu: 0-32,4 cm - grunt 1; 32,4-37,5 cm - grunt 2; 37,5-43,5 cm - żwir; 43,5-54,0 cm - grunt 1; 54,0-58,0 - grunt 2; 58,0-64 cm - żwir. Ponieważ granice między poszczególnymi warstwami nie przebiegały idealnie poziomo, powyższe wartości odzwierciedlają średnią głębokość położenia danej granicy. Odchylenia od tych wartości mogą wynosić do ok. ± 1 cm. Warstwy dobrze przepuszczalne, zbudowane ze żwiru, zostały oddzielone od warstw słabiej przepuszczalnych (piasków) za pomocą włókniny filtracyjnej w celu uniemożliwienia przemieszczania się ziaren piasku do przestrzeni porowej, zawartej między ziarnami żwiru. W górnej warstwie gruntu umieszczono rurkę perforowaną do zatłaczania LNAPL, której dolna krawędź była położona powyżej strefy wzniosu kapilarnego wody, tuż pod powierzchnią gruntu. Tak przygotowana kolumna badawcza została wypełniona wodą w taki sposób, aby zwierciadło wody znalazło się na wstępnie ustalonym poziomie (kilkanaście centymetrów poniżej dolnej krawędzi rurki do zatłaczania LNAPL).

Po 4 dobach do kolumny, bezpośrednio powyżej strefy wzniosu kapilarnego, zatłoczono 100 cm^3 LNAPL, zabarwionej za pomocą barwnika Sudan III, w celu umożliwienia obserwacji warstwy cieczy organicznej poprzez przezroczyste ścianki kolumny. Po następnych 4-5 dobach odczytano wartość miąższości pozornej w studni

obserwacyjnej. Procedury zatłaczania LNAPL i odczytywania miąższości pozornej były powtarzane 5 razy (przy piątym zatłoczeniu do układu dodano jedynie 45 cm³ LNAPL z powodu zbliżenia się dolnej granicy cieczy organicznej w studni do dna kolumny). Poziom zwierciadła wody w trakcie trwania eksperymentu był utrzymywany na stałym poziomie. Górna część kolumny badawczej została zabezpieczona przed parowaniem w trakcie trwania eksperymentu. Eksperyment był prowadzony w temperaturze 20 ±2°C.

Wyniki badań i dyskusja

W tabeli 2 przedstawiono zmiany wartości miąższości pozornej LNAPL w zależności od objętości LNAPL w układzie badawczym. Położenie swobodnego zwierciadła wody było utrzymywane w trakcie trwania eksperymentu na stałym poziomie, który wynosił 17,2 ±0,1 cm pod powierzchnią gruntu.

Tabela 2

Objętości LNAPL w kolumnie i położenie górnej i dolnej granicy warstwy LNAPL w studni

Table 2

LNAPL volumes in the column and vertical distributions of LNAPL layer in the well

Nr próby	Objętość zatłoczonej LNAPL [cm ³]	Objętość LNAPL w kolumnie [cm ³]	Głębokość do górnej granicy warstwy LNAPL w studni [cm]	Głębokość do dolnej granicy warstwy LNAPL w studni [cm]	Miąższość pozorna LNAPL [cm]	Przyrost miąższości pozornej [cm]
1	100	100	17,0 ±0,1	24,5 ±0,1	7,5 ±0,2	7,5 ±0,2
2	100	200	15,5 ±0,1	33,7 ±0,1	18,2 ±0,2	10,7 ±0,4
3	100	300	15,0 ±0,1	37,8 ±0,1	22,8 ±0,2	4,6 ±0,4
4	100	400	14,9 ±0,1	41,8 ±0,1	26,9 ±0,2	4,1 ±0,4
5	45	445	14,5 ±0,1	42,1 ±0,1	27,6 ±0,2	0,7 ±0,4

Otrzymane wyniki wskazują, że najwyższe wzrosty wartości miąższości pozornej obserwowano na początku eksperymentu (pomiar 1 i 2). Wzrost miąższości po drugim zatłoczeniu był najwyższy i wyniósł 10,7 ±0,4 cm (przy miąższości pozornej równej 18,2 ±0,2 cm). Wzrosty miąższości pozornej po trzecim i czwartym zatłoczeniu LNAPL były już zdecydowanie niższe i wyniosły odpowiednio: 4,6 ±0,4 cm oraz 4,1 ±0,4 cm. Najmniejszy przyrost miąższości pozornej, wynoszący jedynie 0,7 ±0,4 cm, zaobserwowano po ostatnim, piątym, zatłoczeniu LNAPL.

Spadek przyrostu miąższości LNAPL po trzecim i czwartym zatłoczeniu cieczy organicznej do układu był spowodowany dotarciem dolnej granicy warstwy LNAPL w studni do pierwszej warstwy dobrze przepuszczalnej i przedostawaniem się części LNAPL w głąb tej warstwy (rys. 1). Wyniki zamieszczone w tabeli 2 odzwierciedlają usytuowanie LNAPL w studni po kilku dniach od każdego zatłoczenia. Tymczasem, począwszy od trzeciego zatłoczenia, dolna granica warstwy LNAPL w studni, obserwowana tuż po dodaniu cieczy organicznej, była położona niżej niż ta ustabilizowana po kilku dniach, co było związane z powolną infiltracją LNAPL do wnętrza warstwy dobrze przepuszczalnej. Na rysunku 1 widać, że około 2/3 przestrzeni porowej w warstwie dobrze przepuszczalnej (jej górna część) jest zajęte przez LNAPL, a około 1/3 tej warstwy (dolna część) zajmuje woda. Początkowo, po czwartym zatłoczeniu cieczy organicznej, LNAPL była obecna jedynie w studni, dając w efekcie miąższość pozorną o kilka

centymetrów wyższą niż ostateczna wartość podana w tabeli 2, o czym świadczy jasny osad na ścianie studni, bezpośrednio poniżej warstwy LNAPL. Jednak nadmiar LNAPL stopniowo infiltrował do warstwy dobrze przepuszczalnej, prowadząc do zmniejszania się miąższości pozornej.



Rys. 1. LNAPL widoczna w wyżej położonej warstwie dobrze przepuszczalnej po jej czwartym zatłoczeniu
Fig. 1. LNAPL visible in the upper part of upper high permeable layer after its fourth addition

Z kolei bardzo wyraźny spadek przyrostu miąższości po piątym zatłoczeniu LNAPL był spowodowany nie tylko dodaniem zmniejszonej porcji oleju (jedynie 45 cm³), ale przede wszystkim ciągłą infiltracją LNAPL do pierwszej warstwy dobrze przepuszczalnej i dotarciem dolnej granicy LNAPL w studni do drugiej warstwy dobrze przepuszczalnej. W wyniku tej infiltracji, po kilku dniach od piątego zatłoczenia, dolna granica LNAPL, która początkowo pojawiła się w pobliżu dna studni, przesunęła się wyżej i ustabilizowała się na głębokości 41,8 ±0,1 cm pod powierzchnią gruntu, podobnie jak po czwartym zatłoczeniu.

Dalsze obserwacje, prowadzone po ok. 2 miesiącach od ostatniego zatłoczenia LNAPL, wskazują, że w tym okresie następowało powolne pionowe przesączenie się cieczy organicznej z pierwszej warstwy o wysokiej przepuszczalności lub ewentualnie bezpośrednio ze studni do wyżej leżących warstw słabiej przepuszczalnych, zbudowanych z gruntów 1 i 2. Ostatecznie, duża ilość LNAPL zatrzymała się w okolicach poziomu swobodnego zwierciadła wody oraz strefy wzniosu kapilarnego wody, stanowiąc wtórne zanieczyszczenie ośrodka porowatego. Górna krawędź plamy tego zanieczyszczenia znalazła się na głębokości ok. 9 cm, a dolna ok. 19 cm pod powierzchnią gruntu, podczas gdy na etapie zatłaczania LNAPL skażeniu uległa tylko wierzchnia warstwa gruntu (ok. 4 cm). Grunt, przez który przemieszczała się LNAPL, zawarty pomiędzy pierwszą warstwą dobrze przepuszczalną a plamą wtórnego zanieczyszczenia, wyraźnie został zanieczyszczony rezydualną fazą zanieczyszczenia.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że istnieje możliwość zanieczyszczenia górnych partii strefy saturacji lekką cieczą organiczną w sytuacji, gdy LNAPL obecna w otworze obserwacyjnym dotrze do warstwy dobrze przepuszczalnej (szczelin, spękań), odsłoniętej przez studnię. Dodatkowo, w takiej sytuacji może dojść do zanieczyszczenia strefy saturacji położonej powyżej warstw o wysokiej przepuszczalności rezydualną SR.

Badania potwierdzają, że istnienie warstw dobrze przepuszczalnych, mających kontakt z zafiltrowaną studnią, może mieć wpływ na zmniejszenie się miąższości pozornej, a tym samym na prawidłowe oszacowanie na jej podstawie miąższości rzeczywistej lub jednostkowej objętości LNAPL, co w konsekwencji wpływa na dokładność ustalenia objętości LNAPL możliwej do szczypania.

Wnioski

1. Jeżeli warstwa dobrze przepuszczalna znajduje się w kontakcie hydraulicznym z zafiltrowaną studnią, w której na zwierciadle wody zalega LNAPL, ciecz organiczna może przesączać się do tej warstwy.
2. Znaczna ilość LNAPL może przesączać się pionowo, ku górze, z warstw dobrze przepuszczalnych, mających kontakt ze studnią obserwacyjną, do wyżej położonych warstw słabiej przepuszczalnych.
3. Odwiercanie otworów w warstwie wodonośnej, w której na zwierciadle wody podziemnej obecna jest plama LNAPL, może prowadzić do niekontrolowanego rozszerzenia zasięgu strefy zanieczyszczonej. Dlatego po odwierceniu otworu należy możliwie szybko przystąpić do szczypania wolnego produktu.
4. Istnienie warstwy dobrze przepuszczalnej, pozostającej w kontakcie hydraulicznym z zafiltrowaną częścią studni, może wpływać na zmniejszenie się miąższości pozornej, a tym samym na dokładność oszacowania miąższości rzeczywistej lub jednostkowej objętości LNAPL.
5. Nasylenie LNAPL zależy od uziarnienia gruntu. Grunty grubiej uziarnione mogą akumulować większe ilości LNAPL niż grunty drobno uziarnione.

Podziękowania

Praca została sfinansowana w ramach badań statutowych BS-PB/401/306/11.

Literatura

- [1] Malina G. Wielofazowa migracja zanieczyszczeń ropopochodnych w strefie aeracji i saturacji. *Inż Ochr Środ.* 1998;1(1):85-105.
- [2] Rosik-Dulewska C, Karwaczyńska U, Ciesielczuk T. Migracja WWA z nieuszczelnionego składowiska odpadów do wód podziemnych. *Roczn Ochr Środ.* 2007;9:335-343.
- [3] Jabłońska B. Sorption of phenol on rock components occurring in mine drainage water sediments. *Int J Miner Process.* 2012;104-105:71-79. DOI: 10.1016/j.minpro.2011.12.008.
- [4] Lenhard R.J., Oostrom M., Dane J.H. A constitutive model for air-NAPL-water flow in the vadose zone accounting for immobile, non-occluded (residual) NAPL in strongly water-wet porous media. *J Contam Hydrol.* 2004;71:261-282. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2003.10.014.
- [5] Newell CJ, Acree SD, Ross RR, Huling SG. Light Nonaqueous Phase Liquids, Ground Water Issue. EPA/540/S-95/500. 1995.
- [6] Włodarczyk-Makuła M, Janosz-Rajczyk M. Wymywanie WWA, AOX i metali ciężkich z mieszaniny gleby i osadów ściekowych. *Inż Ochr Środ.* 2006;9(4):409-420.
- [7] Korzeniowska-Rejmer E, Izdebska-Mucha D. Ocena wpływu zanieczyszczeń ropopochodnych na uziarnienie i plastyczność gruntów spoistych. *Inż Ochr Środ.* 2006;9(1):89-103.
- [8] Nowak M, Kacprzak M, Grobelak A. Osady ściekowe jako substytut glebowy w procesach remediacji i rekultywacji terenów skażonych metalami ciężkimi. *Inż Ochr Środ.* 2010;13(2):121-131.
- [9] Light Non-Aqueous Phase Liquid Management Strategy, Guidance Document 2-02. Minnesota Pollution Control Agency; July 2010.

- [10] Hernández-Espriú A, Martínez-Santos P, Sánchez-León E, Marín LE. Free-product plume distribution and recovery modeling prediction in a diesel-contaminated volcanic aquifer. *Phys Chem Earth*. 2012;37-39:43-51. DOI: 10.1016/j.pce.2010.12.007.
- [11] Dippenaar MA, Sole MD, Van Rooy JL, du Toit GJ, Reynecke JL. Determining actual LNAPL plume thickness: review and case study in a fractured aquifer. *Bull Eng Geol Environ*. 2005;64:347-360. DOI: 10.1007/s10064-005-0278-5.
- [12] USEPA. How to effectively recover free product at leaking underground storage tank sites: A guide for state regulators. EPA 510-R-96-001. 1996.
- [13] Charbeneau RJ. LNAPL Distribution and Recovery Model. *Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media*. Vol. 1. API Publication 4760. Washington, DC.: API Publications; 2007.
- [14] Lenhard RJ, Parker JC. Estimation of free hydrocarbon volume from fluid levels in monitoring wells. *Ground Water*. 1990;28(1):57-67. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02229.x.
- [15] Farr AM, Houghtalen RJ, McWhorter DB. Volume estimation of light nonaqueous phase liquids in porous media. *Ground Water*. 1990;28(1):48-56. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02228.x.
- [16] Golder Associates Ltd. Report on guidance on assessment of light non-aqueous phase liquid mobility for site classification purposes in British Columbia. Report Submitted to BC Ministry of Environment. October 9. 2008. 46 pp. (no. 08-1436-0016).
- [17] H₂A Environmental, Ltd. LNAPL Thickness Revitalized. *Appl NAPL Sci Rev*. 2011;1(1). <http://www.h2altd.com/wp-content/uploads/2011/02/ANSR-v1i1.pdf>.
- [18] Deska I, Tkaczyńska A. Empirical model for estimating the actual LNAPL thickness based on the hydraulic conductivity. *Ecol Chem Eng A*. 2012;19(7):787-794. DOI: 10.2428/ecea.2012.19(07)078.
- [19] Deska I, Ociepa E. Wpływ parametrów gruntów na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną LNAPL na zwierciadle wody podziemnej. *Inż Ochr Środ*. 2012;15(2):191-202.
- [20] Adamski M, Kremesec V, Kolhatkar R, Pearson C, Rowan B. 2005. LNAPL in fine-grained soils: conceptualization of saturation, distribution, recovery and their modeling. *Ground Water Monit Rev*. 2005;25:100-112. DOI: 10.1111/j.1745-6592.2005.0005.x.
- [21] Hawthorne JM, Adamski M, Garg S, Kirkman A. Confined LNAPL Definition, Conditions and Terminology. *Appl NAPL Sci Rev*. 2011;1(5). <http://www.h2altd.com/wp-content/uploads/2011/05/ANSR-v1i5.pdf>.

THE POSSIBILITY OF THE LIGHT NON-AQUEOUS PHASE LIQUIDS MIGRATION IN THE LAYERED POROUS MEDIUM

Institute of Environmental Engineering, Czestochowa University of Technology

Abstract: The light non-aqueous phase liquids (LNAPLs) percolating into the subsurface environment present a threat to soil and groundwater. When the LNAPL plume floats on the groundwater table the initial remediation step should be its recovery. In order to a proper design and monitoring of LNAPL recovery an estimation of the actual LNAPL thickness or specific LNAPL volume is required. These parameters are always computed on the base of the LNAPL thickness measured in the monitoring well (the apparent thickness). The apparent LNAPL thickness can be even several times greater than the actual thickness. The difference between these thicknesses depends on the properties of soil and the properties and amount of LNAPL on the groundwater table. The major objectives of this study became to investigate if LNAPL present in the monitoring well can contaminate the high permeable soil layers lying below the LNAPL body. Obtained results show that the considerable part of LNAPL penetrated the high permeable soil layer hydraulically connected to the soil boring. Additionally, the existence of the high permeable layer has influenced the value of apparent thicknesses. It can complicate the estimation of the actual thickness or specific volume of LNAPL on the groundwater table.

Keywords: LNAPL, actual thickness, apparent thickness, monitoring well, layered porous medium