

Iwona DESKA¹ i Ewa OCIEPA¹

WPŁYW WAHAŃ POZIOMU ZWIERCIADŁA WODY PODZIEMNEJ NA RÓŻNICĘ MIĘDZY MIĄŻSZOŚCIĄ POZORNĄ I RZECZYWISTĄ LNAPL

IMPACT OF THE WATER TABLE FLUCTUATIONS ON THE DIFFERENCE BETWEEN APPARENT AND ACTUAL LNAPL THICKNESS

Abstrakt: Miąższość pozorna lekkiej cieczy organicznej (LNAPL) na zwierciadle wody podziemnej zawsze różni się od miąższości rzeczywistej, a różnica między nimi zależy od właściwości gruntu oraz właściwości i ilości LNAPL. Dodatkowym czynnikiem komplikującym ustalanie miąższości rzeczywistej są zmiany wysokości hydraulicznej. W przypadku obniżania się wysokości hydraulicznej miąższość pozorna wzrasta. Z kolei w przypadku ponownego podwyższania poziomu zwierciadła wody podziemnej miąższość pozorna maleje, podczas gdy miąższość rzeczywista się zwiększa. Uzyskane wyniki potwierdzają, że wahania poziomu zwierciadła wody podziemnej w znacznym stopniu komplikują ustalanie objętości mobilnej LNAPL w ośrodku porowatym na podstawie miąższości pozornej.

Słowa kluczowe: LNAPL, miąższość rzeczywista, miąższość pozorna, wysokość hydrauliczna, zwierciadło wody podziemnej

Wprowadzenie

Lekkie ciecze organiczne niemieszające się z wodą (LNAPL) dostają się do środowiska wodno-gruntowego na skutek wycieków z uszkodzonych, nieszczelnych podziemnych zbiorników magazynujących paliwa, a także w wyniku awarii rurociągów transportujących paliwa, wypadków z udziałem cystern itp. [1]. Pewna ilość substancji ropopochodnych (SR) trafia do środowiska gruntowo-wodnego podczas eksploatacji złóż paliw kopalnych, np. węgla kamiennego [2]. W przypadku wycieku LNAPL do gruntu jej transport odbywa się w trzech etapach [1, 3]: (1) pionowa infiltracja poprzez strefę aeracji, która zachodzi głównie pod wpływem działania siły grawitacji, (2) poziome rozprzestrzenianie się na powierzchni zwierciadła wody podziemnej w kierunku zgodnym z gradientem hydraulicznym w ośrodku wodno-gruntowym, (3) stabilizacja, podczas której następuje zahamowanie poziomego rozprzestrzeniania się plamy wolnego produktu. Po osiągnięciu stanu stabilizacji, na skutek wahań poziomu zwierciadła wody podziemnej, może nastąpić pionowe przemieszczanie się warstwy LNAPL [4]. Na tym etapie zarówno wolny produkt, jak i faza rezydualna LNAPL stanowią źródło wtórnego zanieczyszczenia frakcjami rozpuszczalnymi [5]. Nawet wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), które są słabo rozpuszczalne w wodzie, w określonych warunkach mogą być wymywane z zanieczyszczonej gleby i stanowić zagrożenie dla wód podziemnych [6]. Należy podkreślić, że w wyniku długotrwałej infiltracji SR przez warstwę gruntów spoiwych stanowiących barierę ochronną dla zbiorników wód podziemnych może dojść do zmiany pierwotnych właściwości tych gruntów i pogorszenia się ich zdolności izolacyjnych [7]. Dlatego w przypadku zanieczyszczenia gruntu SR

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

istnieje konieczność prowadzenia remediacji i rekultywacji ośrodka wodno-gruntowego przy zastosowaniu odpowiednio dobranych technik [3]. Tereny wymagające rekultywacji charakteryzują się nie tylko zmianami morfologii, ale również zakłóceniem przebiegu procesów biologicznych i często skażeniem związkami toksycznymi [8]. Należy podkreślić, że rekultywacja terenów zdegradowanych wiąże się nie tylko z ich oczyszczaniem, ale także z koniecznością odnowy ich właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych [9].

W przypadku zalegania warstwy LNAPL na zwierciadle wody podziemnej wstępny etap remediacji powinno stanowić jej szczypanie [10].

W celu prawidłowego zaprojektowania operacji szczypania niezbędne jest ustalenie objętości wolnej (mobilnej) LNAPL [11], która może zostać oszacowana na podstawie pomiaru miąższości LNAPL w studniach obserwacyjnych odwierconych w kilku punktach zanieczyszczonego obszaru [12]. Jednak miąższość zmierzona w studni (tzw. miąższość pozorna) zawsze różni się od miąższości rzeczywistej na zwierciadle wody podziemnej [13, 14]. Różnica ta zależy od właściwości gruntu oraz ilości i właściwości LNAPL (przede wszystkim gęstości) [15]. Dodatkowym czynnikiem, który wpływa na zależność między ww. miąższościami, a tym samym bardzo komplikuje ustalanie miąższości rzeczywistej na podstawie pozornej, są wahania rzędnej zwierciadła wody podziemnej [16-19].

Podczas zmian wysokości hydraulicznej soczewka LNAPL przemieszcza się w górę lub w dół, co prowadzi do zwiększania się objętości gruntu zanieczyszczonego rezydualną LNAPL [16, 17]. Podczas obniżania poziomu zwierciadła wody podziemnej soczewka LNAPL również przemieszcza się w dół, powodując pionowe zwiększenie zasięgu zanieczyszczonego gruntu. Z kolei podczas wzniosu zwierciadła wody część LNAPL przemieszcza się wyżej, ale znaczna jej ilość w postaci pojedynczych kropli zostaje zatrzymana pomiędzy ziarnami gruntu i otoczona przez wodę, utrzymując się w przestrzeni porowej pod zwierciadłem wody. Zjawisko to wpływa na zmniejszenie się objętości wolnego produktu i równoczesne rozszerzenie się strefy zanieczyszczenia rezydualnego [17]. Z kolei podczas obniżania zwierciadła wody, które następuje po wcześniejszym jego wzniosie, część LNAPL pozostaje na ziarnach gruntu nad strefą wzniosu kapilarnego w postaci zaadsorbowanej lub jako faza rezydualna, przy równoczesnym, ewentualnym uwalnianiu LNAPL wcześniej unieruchomionej pod zwierciadłem wody, co może w konsekwencji wpływać na ponowne zwiększenie się objętości mobilnej LNAPL [17]. Podczas wahań zwierciadła wody zmienia się zależność między miąższością pozorną i rzeczywistą, co może często prowadzić do nieprecyzyjnego oszacowania miąższości rzeczywistej LNAPL [16, 17].

W trakcie wahań zwierciadła wody podziemnej bardzo istotny wpływ na wzajemne zależności między miąższością pozorną i rzeczywistą LNAPL ma przemieszczanie się wolnego produktu oraz wody pomiędzy studnią a ośrodkiem geologicznym, które często jest pomijane w wielu metodach wyznaczania rzeczywistej miąższości LNAPL [16, 17]. Jeżeli wysokość hydrauliczna w warstwie wodonośnej rośnie, LNAPL drekuje ze studni do gruntu, przy czym po pewnym czasie część cieczy organicznej zaczyna powracać ponownie do studni, dążąc do osiągnięcia stanu równowagi hydraulicznej [16]. Im szybsze są zmiany wysokości hydraulicznej, tym więcej LNAPL odpływa ze studni do otaczającego ją ośrodka [16]. Z kolei, jeżeli wysokość hydrauliczna maleje, LNAPL przemieszcza się do studni. Jednak po pewnym czasie część LNAPL drekuje z powrotem do gruntu,

w następstwie wyrównywania się ciśnień w ośrodku. Im szybciej poziom zwierciadła wody opada, tym większą w konsekwencji uzyskuje się miąższość pozorną [16].

Celem eksperymentów scharakteryzowanych w niniejszym artykule było ustalenie wpływu zmian wysokości hydraulicznej na wartości miąższości pozornej i rzeczywistej LNAPL na zwierciadle wody podziemnej w gruncie piaszczystym równomiernie uziarnionym.

Metodyka badań

Badania wpływu zmian wysokości hydraulicznej na zależność między miąższością pozorną i rzeczywistą były prowadzone z zastosowaniem gruntu piaszczystego o średnicy miarodajnej $d_{10} = 0,33$ mm, współczynnika nierównomierności uziarnienia wg Hazena $U = 2,03$ i współczynnika filtracji względem wody o temperaturze 10°C $k_{10} = 4,2 \cdot 10^1$ m·d⁻¹. Jako LNAPL zastosowano olej rzepakowy o gęstości $\rho = 918$ kg·m⁻³ i lepkości dynamicznej $\mu = 0,07$ kg·m⁻¹·s⁻¹ (w temperaturze 20°C).

Badania prowadzono w kolumnie z plexiglasu o średnicy wewnętrznej 10 cm z wbudowaną studnią obserwacyjną o przekroju półkolistym o średnicy 3,5 cm. W kolumnie badawczej umieszczono także kolumnę wyrównawczą o średnicy 3 cm z perforowanym dnem, która pełniła rolę piezometru i była wykorzystywana do prowadzenia zmian wysokości hydraulicznej.

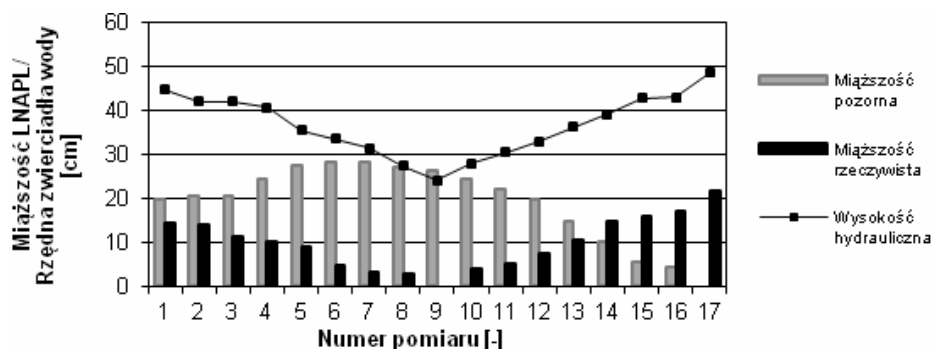
Kolumna badawcza została wypełniona gruntem. W górnej części gruntu, nad planowaną strefą wzniosu kapilarnego wody, umieszczono perforowaną rurkę z plexiglasu do iniekcji LNAPL. Następnie kolumnę napełniono wodą poprzez kolumnę wyrównawczą w taki sposób, by zwierciadło wody podziemnej znalazło się na zaplanowanej wysokości. Po 3 dniach rozpoczęto zatłaczanie do gruntu ok. 600 cm³ LNAPL zabarwionej przy zastosowaniu barwnika Sudan III. Po 4 dniach od zatłoczenia LNAPL zmierzono miąższość pozorną LNAPL w studni i rzeczywistą w gruncie. Jako miąższość rzeczywistą traktowano w tym przypadku odległość między górną i dolną granicą występowania LNAPL w gruncie (wraz ze wzniosem kapilarnym LNAPL). Następnie obniżono rzędną zwierciadła wody w układzie o kilka centymetrów poprzez odpompowanie określonej ilości wody ze studni wyrównawczej i po około 3-4 dniach ponownie zmierzono miąższość pozorną i rzeczywistą LNAPL. Procedurę obniżania poziomu zwierciadła wody i odczytywania miąższości pozornej i rzeczywistej powtarzano kilka razy. Po osiągnięciu położenia, w którym dolna granica warstwy LNAPL w studni zbliżyła się do dna kolumny, zaczęto podwyższać wysokość hydrauliczną poprzez dodawanie odpowiednich porcji wody do kolumny wyrównawczej. Po około 3-4 dniach od każdego podwyższenia zwierciadła wody odczytywano miąższość pozorną i rzeczywistą. Górną część kolumny badawczej zabezpieczono pokrywą w celu ograniczenia parowania płynów. Badania były prowadzone w temperaturze ok. 20°C .

Wyniki badań i dyskusja

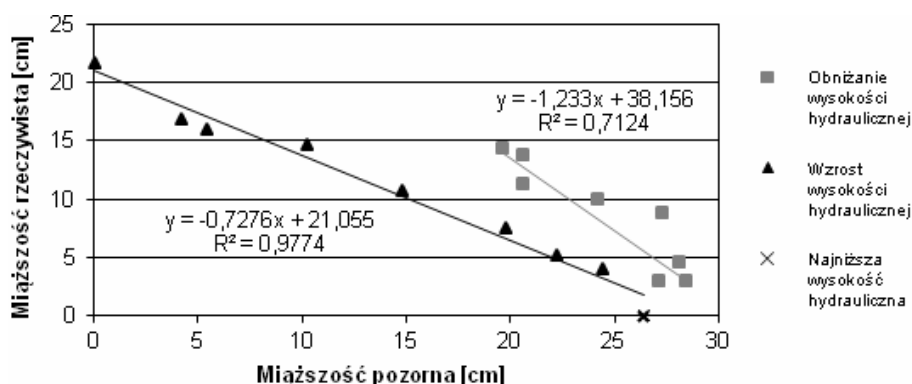
Na rysunku 1 przedstawiono wartości miąższości pozornych i rzeczywistych, odpowiadające zmieniającym się wysokościami hydraulicznym. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że wraz z obniżaniem się poziomu zwierciadła wody podziemnej generalnie wzrastała miąższość pozorną przy wyraźnie malejącej miąższości

rzeczywistej. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że maksymalną wartość miąższości pozornej uzyskano w przypadku pomiaru 7, a więc jeszcze w trakcie obniżania wysokości hydraulicznej. Przy dalszym obniżaniu poziomu zwierciadła wody (pomiar 8 i 9) zaobserwowano bardzo nieznaczne zmniejszanie się miąższości pozornej oraz wyraźne zmniejszanie się miąższości rzeczywistej aż do całkowitego zaniku warstwy LNAPL w gruncie (pomiar 9). Po uzyskaniu zerowej wartości miąższości rzeczywistej rozpoczęto podwyższanie wysokości hydraulicznej, w trakcie którego miąższość pozorna wyraźnie malała, przy zwiększającej się miąższości rzeczywistej. Badania prowadzono do momentu całkowitego zaniku warstwy LNAPL w studni (pomiar 17).

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że końcowa miąższość rzeczywista jest większa od miąższości początkowej, a więc w trakcie trwania eksperymentu doszło do pionowego rozszerzenia się strefy występowania zanieczyszczenia w gruncie.



Rys. 1. Wartości miąższości pozornych i rzeczywistych przy zmieniających się wysokościach hydraulicznych
Fig. 1. Values of apparent and actual thicknesses at varying hydraulic heads



Rys. 2. Zależności między miąższościami pozorną i rzeczywistą przy zmieniających się wysokościach hydraulicznych

Fig. 2. Relationships between apparent and actual thicknesses at varying hydraulic heads

Na rysunku 2 przedstawiono zmieniające się zależności między miąższością pozorną i rzeczywistą w trakcie obniżania i wzniosu zwierciadła wody podziemnej. Wyniki wskazują, że krzywa zależności między miąższościami wykreślona dla obniżania zwierciadła wody podziemnej nie pokryła się z krzywą odpowiadającą wzniosowi zwierciadła. Wyniki te mogą więc potwierdzać występowanie zjawiska histerezy, towarzyszącej stopniom nasycenia gruntu płynami (wodą, LNAPL i powietrzem) podczas obniżania i zwiększania wysokości hydraulicznej.

Otrzymane wyniki potwierdzają, że wahania zwierciadła wody mogą w znacznym stopniu skomplikować ustalanie rzeczywistej miąższości LNAPL na podstawie zmierzonej w otworze miąższości pozornej. Wyniki wskazują, że wzory obliczeniowe dostępne w literaturze powinny być stosowane jedynie w warunkach równowagi hydraulicznej. W sytuacji, w której dochodzi do znacznego obniżenia wysokości hydraulicznej, zastosowanie miąższości pozornej do ustalania miąższości rzeczywistej może spowodować uzyskanie wyników zawyżonych. Z kolei, gdy wysokość hydrauliczna znacznie się podwyższy, miąższość rzeczywista ustalona na podstawie pozornej może być znacznie zaniżona. W skrajnym przypadku może nawet dojść do zaniku warstwy LNAPL w otworze przy obecnym wolnym produkcie w gruncie.

Wyniki badań potwierdzają, że znaczenie dla zależności między miąższością pozorną i rzeczywistą ma fakt, czy zmiana wysokości hydraulicznej jest efektem wzniosu czy obniżania zwierciadła wody podziemnej.

Dużą rolę podczas prowadzenia eksperymentu odgrywały wymiary stanowiska badawczego (stosunek pola przekroju poziomego części kolumny wypełnionej gruntem do pola przekroju studni). W warunkach polowych rozmiar studni powinien odgrywać mniejszą rolę z uwagi na to, że jej pole przekroju jest dużo mniejsze od przekroju zanieczyszczonej strefy gruntu.

Wnioski

1. Uzyskane wyniki potwierdzają, że wahania zwierciadła wody podziemnej w znacznym stopniu komplikują ustalanie rzeczywistej miąższości LNAPL na podstawie miąższości pozornej.
2. Podczas obniżania wysokości hydraulicznej miąższość pozorna wzrasta, podczas gdy miąższość rzeczywista maleje.
3. Podczas podwyższania wysokości hydraulicznej miąższość pozorna maleje przy wzrastającej miąższości rzeczywistej. Przy odpowiednio wysokiej wartości wysokości hydraulicznej może dojść do sytuacji, w której w studni nie będzie obecna warstwa LNAPL.
4. Wyniki badań wskazują, że krzywa zależności między miąższością pozorną i rzeczywistą, wykreślona w warunkach obniżania zwierciadła wody podziemnej, nie pokrywa się z krzywą wykreślona w przypadku wzniosu zwierciadła, co dodatkowo może komplikować ustalanie rzeczywistej miąższości LNAPL.
5. Otrzymane wyniki potwierdzają, że podczas wahań poziomu zwierciadła wody podziemnej dochodzi do pionowego rozszerzenia strefy występowania zanieczyszczenia w gruncie.

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 Środow.* 1998;1(1):85-105.
- [2] 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.
- [3] Zadroga B, Olańczuk-Neyman K. Ochrona i rekultywacja podłoża gruntowego: aspekty geotechniczno-budowlane. Gdańsk: Wyd Politechniki Gdańskiej; 2001.
- [4] Minnesota. Light Non-Aqueous Phase Liquid Management Strategy, Guidance Document 2-02, Minnesota Pollution Control Agency, July 2010.
- [5] Newell CJ, Acree SD, Ross RR, Huling SG. Light Nonaqueous Phase Liquids, Ground Water Issue. EPA/540/S-95/500. 1995.
- [6] Włodarczyk-Makula M, Janosz-Rajczyk M. Wymywanie WWA, AOX i metali ciężkich z mieszaniny gleby i osadów ściekowych. *Inż Ochr Środow.* 2006;9(4):409-420.
- [7] Korzeniowska-Rejmer E, Izdebska-Mucha D. Ocena wpływu zanieczyszczeń ropopochodnych na uziarnienie i plastyczność gruntów spoistych. *Inż Ochr Środow.* 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 Środow.* 2010;13(2):121-131.
- [9] Kacprzak M. Wspomaganie procesów remediacji gleb zdegradowanych. Seria Monografie nr 128. Częstochowa: Wyd Politechniki Częstochowskiej; 2007.
- [10] Hernández-Espriú A, Martínez-Santos P, Sánchez-León E, Marín L.E. 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] 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.
- [13] 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.
- [14] 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 p. (no. 08-1436-0016).
- [15] USEPA. How to effectively recover free product at leaking underground storage tank sites: A guide for state regulators. EPA 510-R-96-001. 1996.
- [16] Aral MM, Liao B. Effect of groundwater table fluctuations on LNAPL thickness in monitoring wells. *Environ Geol.* 2002;42:151-161. DOI: 10.1007/s00254-001-0485-8.
- [17] Kemplowski MW, Chiang CY. Hydrocarbon thickness fluctuations in monitoring Wells. *Ground Water* 1990;28:244-252. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02252.x.
- [18] 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.
- [19] Marinelli F, Durnford DS. LNAPL thickness in monitoring wells considering hysteresis and entrapment. *Ground Water.* 1996;34(3):405-414. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1996.tb02021.x.

IMPACT OF THE WATER TABLE FLUCTUATIONS ON THE DIFFERENCE BETWEEN APPARENT AND ACTUAL LNAPL THICKNESS

Institute of Environmental Engineering, Czestochowa University of Technology

Abstract: The actual LNAPL thickness on the groundwater table is always different from the apparent LNAPL thickness. This difference depends on the properties of soil and the amount and properties of LNAPL. Additional factors influencing the difference between apparent and actual thicknesses are the hydraulic head fluctuations. The major objectives of this study became to investigate the impact of hydraulic head fluctuations on the measured apparent and actual LNAPL thicknesses. Obtained results show that when the hydraulic head decreases, the apparent LNAPL thickness increases. Instead, when the hydraulic head rises, the apparent LNAPL thickness decreases, and the actual thickness increases. The results affirm that hydraulic head fluctuations complicate considerably the estimation of the mobile LNAPL volume on the base of the apparent LNAPL thickness.

Keywords: LNAPL, actual thickness, apparent thickness, hydraulic head, groundwater table

