

WOJCIECH SOŁTYK, JOLANTA WALENDZIAK

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Techniki Geologicznej

**ZASTOSOWANIE METODY ZNACZNIKOWEJ W ROZPOZNANIU
WARUNKÓW HYDROGEOLOGICZNYCH NA PRZYKŁADZIE BADAŃ
W REJONIE DOLINKI SŁUŻEWIECKIEJ**

UKD 556.314.611.02:556.34(438.111)

Budowany aktualnie, pierwszy odcinek linii warszawskiego metra przecina m.in. rejony (Dolinka Służewiecka i Pole Mokotowskie) wymagające intensywnych prac odwodnieniowych. System odwodnienia zagwarantować musi wymogi okresu budowy tunelu, jak i przyszłej eksploatacji metra, gdy kilkunastometrowej wysokości betonowe ściany staną się szczelnym ekranem zakłócającym naturalny przepływ wód podziemnych. Rozpoznanie warunków hydrogeologicznych stref intensywnie zawodnionych jest istotnym elementem projektu optymalnego systemu odwodnienia.

W ramach prac hydrogeologicznych wykonanych w rejonie przecięcia Dolinki Służewieckiej przez linię metra wykorzystano znacznikową metodę pomiaru rzeczywistej prędkości przepływu wód podziemnych. Badania podjęto z inicjatywy Generalnej Dyrekcji Budowy Metra. Utylitar-nym celem pracy było określenie kinetycznych parametrów przepływu wód w różnych litologicznie, piaszczysto-żwirowych utworach czwartorzędowych, zalegających w pionowym profilu Dolinki Służewieckiej.

Dla wykonawcy pracy istotny był aspekt jednoczesnego

zastosowania trzech traserów przepływu: dwóch izotopów promieniotwórczych oraz barwnika i związany z tym problem detekcji w wodach każdego z użytych wskaźników.

$$t_0 \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$$

ZNACZNIKOWE BADANIA HYDROGEOLOGICZNE

Przy wszelkiego rodzaju badaniach wód podziemnych zawsze występuje konieczność określenia kierunku i prędkości ich przepływu. W 1986 r. G. Knutsson (1) podsumował wyniki prac wykonanych przez różnych badaczy w okresie minionego półwiecza, a dotyczących zastosowania sztucznych traserów do pomiarów kinetyki ruchu wód. Już w końcu ubiegłego stulecia użyto po raz pierwszy barwnika do ustalenia hydraulicznego kontaktu pomiędzy porami i źródłami w krasie oraz soli kuchennej do określenia pochodzenia przecieków wód w tunelach.

Jednak dopiero produkcja sztucznych radioizotopów oraz czułych przyrządów detekcyjnych, z początkiem lat pięćdziesiątych, spowodowała szczególny rozwój metod wskaźnikowych w hydrogeologii. Istotny był również postęp w zakresie interpretacji wyników pomiarów terenowych. Teoretyczne zagadnienia związane z ruchem wskaźnika przy przepływie wód przez ośrodki porowate wnikliwie przedyskutował A. Zuber (7). Dokonał on również reinterpretacji wyników doświadczeń laboratoryjnych i prac terenowych uzyskanych przez innych autorów w oparciu o nowe rozwiązanie równania dyspersji dla iniekcji punktowej i przepływu jednowymiarowego.

Istnieje wiele metod wykorzystujących sztuczne znaczniki do badań przepływu wód podziemnych. Zainteresowanym poleca się cytowaną pracę A. Zuber (7).

Dla dalszych rozważań istotna jest bliższa prezentacja tzw. dwuotworowej metody impulsowej. Polega ona na wprowadzeniu wskaźnika do jednego otworu (piezometru iniekcyjnego) i obserwacji zmiany jego stężenia w innym otworze (studni pompowanej). Rzeczywistą prędkość przepływu wyznacza się z podstawowego wzoru dla ruchu jednostajnego, prostoliniowego:

$$V = \frac{x}{t_0}$$

x – odległość między otworem iniekcyjnym i pompowym,

t_0 – średni czas pojawienia się wskaźnika w otworze pompowanym, liczony od momentu iniekcji.

Znając porowatość efektywną n oraz spadek hydrauliczny i możemy wyznaczyć współczynnik filtracji k :

$$k = \frac{k \cdot x}{i \cdot t_0}$$

Dane doświadczalne, na podstawie których określa się średni czas przepływu między otworami, uzyskane są w postaci krzywej zmian koncentracji znacznika $C(t)_{x=\text{const}}$ w wodzie otworu pompowanego. W zależności od stosowanej techniki detekcyjnej możliwe jest uzyskanie krzywej o zróżnicowanej dyskretyzacji (pomiar ciągły lub próbkowanie w określonych przedziałach czasowych). Dla iniekcji punktowej, dla której opisu matematycznego można stosować teoretyczną funkcję „delta” Diraca o własnościach:

$$\begin{cases} C(t=0) = \infty \\ C(t \neq 0) = 0 \end{cases}$$

definicja średniego czasu przepływu podana jest równaniem:

A. Kreft i A. Lenda (2, 3) opracowali algorytmy oraz szereg programów pozwalających na wyznaczenie średniego czasu przepływu dla metody dwuotworowej. W przypadku przepływu liniowego, dyspersji jednowymiarowej (jedynie wzdłuż osi x , tj. w kierunku przepływu) i iniekcji punktowej program bazuje na zaproponowanym przez A. Zuber (7) rozwiązaniu równania dyspersji.

W znormalizowanej, przydatnej dla rozkładów czasowych postaci, rozwiązanie to podane jest jako funkcja dwuparametrowa:

$$E\left(\frac{D}{vx}, \frac{t}{t_0}\right) = \frac{1}{\sqrt{4\pi \frac{D}{vx} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^3}} \exp\left[-\frac{(1 - \frac{t}{t_0})^2}{4 \frac{D}{v \cdot x} \cdot \frac{t}{t_0}}\right]$$

Zmienne tego rozwiązania są bezwymiarowe:

- znormalizowany parametr czasowy $\frac{t}{t_0}$,
- odwrotność kryterialnej liczby Pecleta $Pe = \frac{v \cdot x}{D}$ gdzie: D – współczynnik dyspersji.

Odrębny problem stanowi wybór właściwego znacznika dla badań hydrogeologicznych. J. Lebecka (4) podaje za Devisem charakterystykę idealnego traseru przepływu; powinien on posiadać następujące cechy:

- łatwą mierzalność i wykrywalność z dużą czułością,
- niskie stężenie naturalne w badanej wodzie,
- nie może zmieniać warunków przepływu,
- nie powinien być zatrzymywany w środowisku, przez które przepływa,
- nie może powodować zagrożenia dla naturalnego środowiska i dla osób wykonujących badania,
- w przypadku stosowania znaczników promieniotwórczych należy dobrać okres połowicznego rozpadu odpowiednio do czasu trwania badań terenowych.

Wymienione cechy należy uzupełnić o jeszcze jedną; w przypadku jednoczesnego stosowania kilku traserów należy dobrać je tak, aby możliwa była niezakłócona detekcja każdego z nich, gdy występują równocześnie w tej samej próbce wody. Stosowane sztuczne znaczniki można podzielić na kilka grup:

- barwniki fluorescencyjne (uranina, eozyna, rodamina),
- chemiczne, z reguły aniony silnie elektroujemne (chlorki, jodki, bromki),
- substancje biologiczne (np. lycopodium),
- znaczniki stabilne, wykrywane metodami analizy aktywacyjnej, z reguły metale w formie kompleksów chelatowych,
- izotopy promieniotwórcze (^{82}Br , ^{131}J , ^{51}Cr , ^3H , ^{60}Co itp.), z tym że formy kationowe wymagają uprzedniego skompleksowania. Celowe jest również użycie nieaktywnych nośników, zmniejszających straty sorbcyjne,
- inne np. detergenty.

Wybór właściwych znaczników do badań hydrogeologicznych jest z reguły kompromisem pomiędzy znanymi eksperymentatorom zaleceniami, a możliwościami wynikającymi z wyposażenia w czułą aparaturę detekcyjną. W Polsce powszechniej stosowane są jako sztuczne znaczniki przepływu wód podziemnych: izotopy promienio-

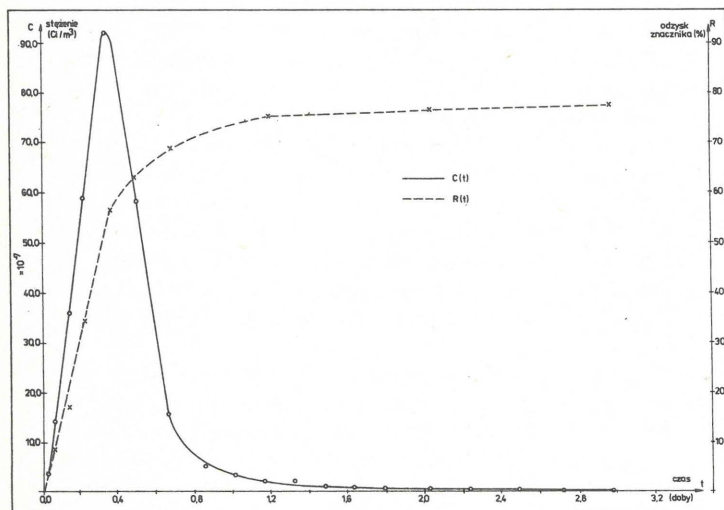
okazał się wpływ luminescencji, spowodowany obecnością fluoresceiny w próbkach wody, na wynik pomiaru stężenia trytu. Chemiluminescencja jest zjawiskiem powodującym powstawanie większej ilości kwantów świetlnych aniżeli fotoaktywności. Efekt ten występuje wyraźniej przy próbkach zasadowych. Samorzutny proces zaniku chemiluminescencji jest powolny (może trwać do 72 godz.). Handlowe ciekłe scyntylatory nie zawierają w swym składzie inhibitora luminescencji. Ustalono doświadczalnie, że dodatek kwasu octowego skutecznie skraca czas niezbędnego wyciemnienia próbek trytowych przed pomiarem licznikowym. Zastosowane procedury analityczne pozwoliły osiągnąć czułość pomiarową rzędu: $1,3 \cdot 10^{-7}$ Ci/m³ dla indu In-114 m oraz $3,5 \cdot 10^{-7}$ Ci/m³ dla trytu H-3, co w pełni zaspokaja wymogi niniejszej pracy, jak i innych badań hydrogeologicznych (5).

PODSUMOWANIE

Wykonane pomiary stężeń wskaźników w pobranych próbkach wody pozwoliły wyznaczyć krzywe przejścia, tj. doświadczalne funkcje chwilowych zmian koncentracji traserów $C(t)_{x=const.}$. W oparciu o bilans masy lub aktywności (dla znaczników izotopowych) wyznaczono również krzywe odzysku – $R(t)$. Przykładowo na ryc. 3 przedstawiono wykres krzywej przejścia i odzysku znacznika izotopowego In-114 m uzyskany w badaniach wykonanych w rejonie Dolinki Służewieckiej.

Postępując zgodnie z omówionymi uprzednio zasadami interpretacji, wyznaczono rzeczywiste prędkości przepływu wód dla poszczególnych układów hydrodynamicznych: piezometry H-1 (1–3) ÷ studnia H. Dla strefy stropowej, pomiędzy piezometrem H-1 (1) a studnią H, średnia prędkość przepływu wód wynosi $V = 0,31$ m/godz. W strefie spągowej, pomiędzy piezometrem H-1 (3), a studnią H, odpowiednio $V = 0,47$ m/godz. Podane wyniki uzyskano dla traserów izotopowych. W trakcie pompowania studni H odzysk wskaźników wynosił: 77,2% dla indu In-114 m i 75,0% dla trytu H-3.

W laboratoryjnych badaniach przepływu przez kolumny



Ryc. 3. Krzywa przejścia i odzysku znacznika In-114 m. Czas od momentu iniekcji do pojawienia się znacznika $t = 1,85$ doby, średni czas przepływu $t_0 = 2,15$ doby, rzeczywista prędkość przepływu $V = 0,31$ m/godz.

Fig. 3. Curves of migration and recorded concentration of tracer In-114. Time interval from introduction to appearance of tracer $t = 1.85$ day, mean time of migration $t_0 = 2.15$ days, actual velocity of flow $V = 0.31$ m/h

różni autorzy prezentują ok. 98% odzysk stosowanych znaczników. Dla warunków terenowych wielkość odzysku trasera waha się od 70 do 80% (7). Aczkolwiek błąd pomiaru stężenia trasera nie przekracza 2–3%, to podstawową przyczyną niepewności bilansu masy wskaźników jest dochodzący do 20% błąd określenia wydatku pompowania. W skrajnych przypadkach uzyskano (8), fizycznie niemożliwy, ponad 120% odzysk znacznika. W przypadku omówionych badań prawie 80% odzysk znacznika upoważnia do sformułowania wniosku, że rzeczywiste prędkości przepływu wód podziemnych mogą być maksymalnie o 10–15% niższe.

Wyniki pomiaru prędkości przepływu dla układu piezometr H-1 (2) – studnia H wymaga odrębnego omówienia. Zastosowany znacznik barwny odzyskano jedynie w 32%. Wdrożony w OBRTG, w oparciu o opracowanie A. Krefta, program „Fluid” pozwala wyznaczyć średni czas przepływu trasera również w przypadku niepełnej rejestracji krzywej przejścia. Na tej podstawie określono, że rzeczywista prędkość przepływu wód w środkowej części warstwy wodonośnej wynosi $V = 0,10$ m/godz. Błąd tego pomiaru jest większy, maksymalnie $\pm 20\%$. W środkowej strefie pionowego profilu studni H zalegają drobne piaski pylaste (ryc. 2), dlatego 3–4 krotnie niższa prędkość przepływu wód dla układu hydrodynamicznego: piezometr H-1 (2) – studnia H jest zgodna z oczekiwaniami.

Jednoczesne użycie trzech traserów jest pierwszym w Polsce praktycznym zastosowaniem metody znacznikowej do hydrogeologicznych badań przepływu wód w zróżnicowanych litologicznie układach warstwowych. Opracowane metody detekcji kilku wskaźników zostały z powodzeniem wykorzystane do badań przepływu wód podziemnych w rejonie stacji hydrogeologicznej I rzędu Sidorówka k. Jeleniewa (5).

Autorzy dziękują dr Marianowi Borowczykowi za pomoc w przeprowadzeniu prac terenowych.

LITERATURA

1. Knutson G. – Ground Water Problems. Pergamon Press, Oxford 1968.
2. Kreft A., Lenda A. – A Fortran program for the interpretation of porosity measurements by the two-well pulse technique. Raport INT 46/1 AGH. Kraków 1974.
3. Kreft A., Lenda A. i in. – Określenie porowatości efektywnej złóż cynkowo-olowiowych. AGH Międzyres. Inst. Fizyki i Techniki Jądrowej, Kraków 1975, (zadanie węzłowe 04.2.1.07.02.) praca niepublikowana.
4. Lebecka J. – In EDTA jako znacznik dla wód kopalnianych. – Praca doktorska (AGH) 1978.
5. Lebecka J., Sołtyk W. i in. – Zastosowanie znaczników $K_3^{60}Co(CN)_6$ oraz ^{114}In EDTA oznaczonych metodą ciekłych scyntylatorów do badań hydrogeologicznych. Raport INT 196/I AGH. Kraków 1986.
6. Padzik A., Sołtyk W. – Aparatura i metodyka elektrolitycznego wzbogacania wody w tryt. Nukleonika 1969 nr 1.
7. Zuber A. – Dyspersja wskaźnika przy przepływach przez ośrodki porowate w aspekcie zastosowań hydrogeologicznych. Zesz. nauk. AGH 1971 z. 302.
8. Zuber A. i in. – Wykonanie pomiarów terenowych prędkości przepływu wód podziemnych między otworami iniekcyjnymi, a barierą studni odwadniających na złożu w Bełchatowie. – PTPNOT Oddz. Kraków, 1977 (praca niepubl.).

S U M M A R Y

Some aspects of use of traces method in evaluating kinetic parameters of groundwater flow are discussed at the example of studies carried out in area where the underground tunnels cut through strongly saturated Quaternary sediments. Simultaneous use of three tracers: fluoresceine, tritium water, and complex radioactive indium In-114m, made possible evaluations of real velocities of water flow in lithologically different sediments of the Dolinka Służewiecka area. Practical methods of accurate and independent measurements of each of the used tracers in water are given.

Р Е З Ю М Е

На примере исследований проведенных в районе пересечения туннелем линии метро сильно заводненных четвертичных отложений, представлены некоторые аспекты использования следоуказательного метода для определения кинетических параметров течения подземных вод. Применяя одновременно три указателя: флуоресцеин, тритиевую воду и комплексный радиоактивный индий In-114, были определены действительные скорости течения вод в литологически разных отложениях Служевецкой долинки. Показаны практические методы проведения чувствительных и независимых измерений концентрации в воде каждого с применённых указателей.