

Някои особености при провеждане и интерпретиране на миграционните опити в полеви условия

Павел Пенчев, Борислав Великов

Пенчев, П., Великов, Б. 1981. Некоторые особенности при проведении и интерпретации миграционных опытов в полевых условиях. — *Инж. геол. и гидрогеол.*, 11, 11—18.

Рассмотрены некоторые новые положения при проведении и интерпретации индикаторных опытов в условиях радиально сходящегося фильтрационного потока к одиночному колодцу. Предложена полумпирическая формула для определения оптимального количества индикатора, которое надо ввести в пусковую скважину — в зависимости от конкретных гидрогеологических условий и от возможностей применяемой химико-аналитической методики. Выведено математическое выражение для средней скорости фильтрации по линии потока, связывающей пусковую и наблюдательную скважины, что позволяет при интерпретации данных миграционного опыта в условиях водооткачки использовать методы, разработанные для опытов при естественном потоке подземных вод.

Адрес: Высший горно-геологический институт, 1156 София.

P e n c h e v, P., V e l i k o v, B. 1981. Some Particularities During Performing and Interpreting of Migration Tests in situ. — *Engineering Geology and Hydrogeology*, 11, 11—18.

Some new treatments of indicator tests performing and interpreting in conditions of a radially concentrating seepage flow towards an isolated well are considered. A semi-empiric formula for determining the optimum quantity of the indicator, which must be put in the bore hole of starting depending on the typical hydrogeologic conditions and possibilities for utilization of chemical-analytic methods is proposed. A mathematical expression for the mean seepage velocity value along the current lines connecting start and observation bore holes is deduced which permits to utilize directly methods, developed for experiments in natural flow of ground waters, in cases of migration test interpretation of issue data in pumping conditions.

Address: Higher Mining Geological Institute, 1156 Sofia.

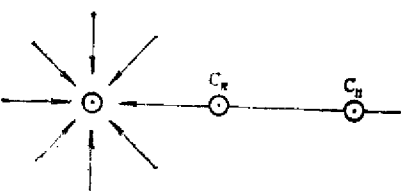
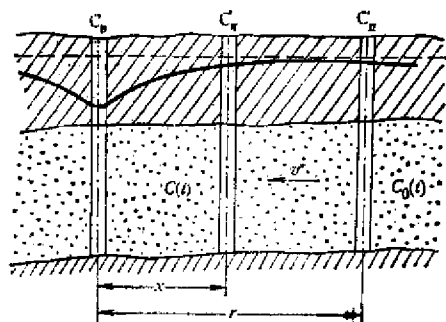
Широко използваният в полевите хидрогеоложки изследвания метод на индикаторите е познат твърде отдавна. Първите опити с индикатори в естествен филтрационен поток обикновено се свързват с Ч. С л и х т е р (S l i c h t e r, 1905), целта на когото е била определянето на действителната скорост U на подземните води. По-късно във връзка с разработването на научно обосновани методи за защита на подземните води от замърсяване възникна необходимостта от определянето и на някои други (миграционни) параметри на филтрационната среда, към които могат да се отнесат коефициентът на филтрационна дифузия (дисперсионен коефициент) D , коефициентът на разпределение при равновесен масообмен n , скоростната константа

на сорбцията y и др. Разработени бяха и други опитни схеми за провеждане на полевите миграционни изследвания освен станалата в известен смисъл „класическа“ схема на Сликтер — метод на разтичането на индикатора в единичен сондаж (Ч у р а е в, И л ъ и н, 1973), метод на нагнетяването на индикатора (В е р и г и н и др., 1977; F r i e d, 1975), метод на нагнетяване и същевременно водочерпене от друг кладенец („дублетна“ схема) (М и р о н е н к о и др., 1980).

В настоящата работа са разгледани някои нови постановки при провеждането и интерпретирането на миграционните опити в условията на водочерпене от единичен кладенец. Независимо от редицата удобства, които тази схема предоставя при практическата реализация на опита, в специалната литература ѝ се отделя скромно внимание. Основната причина за това се крие в отсъствието на точно аналитично решение, описващо движението на индикатора по токовата линия, а оттам и на достатъчно обоснована методика за определяне на миграционните параметри. Разработването на удобна за практическо приложение методика представлява и целта на работата.

Относно провеждането на миграционните опити в условията на водочерпене от единичен кладенец при движение на индикатора по токова линия

Типовата схема на опитно-миграционния участък е показана на фиг. 1. В обсега на депресионната фуния са разположени в един лъч няколко сондажа, единият от които е пусков, а останалите — наблюдателни. Ако има естествено филтрационно течение, направлението на лъча трябва да съвпада с неговата посока. Индикаторът се поставя в пусковия сондаж след достигане на квазистабилзиращия режим на филтрация. Техниката на пускането на индикатора по нищо не се различава от тази в условията на естествен поток на подземните води.



Фиг. 1
Fig. 1

Удобствата при провеждането на опита в тези условия са свързани със сравнително малката му продължителност и разход на индикатор. Освен това определените в рамките на един опитен участък хидродинамични и миграционни параметри създават редица удобства за практическата обосновка на санитарно-охранителните зони на водоизточника.

Важен въпрос при провеждането на индикаторния опит е изборът на оптималното количество индикатор M , което трябва да се пусне в хода на

опита. Неоправданото вкарване на по-голямо количество от необходимото може да причини значителни грешки при интерпретацията на изходните данни поради повишаване на относителното тегло и промяна (увеличаване) на йонната сила на водата, протичане на странични (нежелани) химични

реакции и т. н. Ето защо някои автори препоръчват концентрацията на индикатора-електролит (а такива се използват най-често) при малка минерализация на подземните води да бъде от 3 до 5 g/dm³ (Бочев е р, Орадoв с к а я, 1972).

За определяне на оптималното количество индикатор, което трябва да се пусне в зависимост от конкретните условия, ще изходим от известното решение за мигновения „солеви“ източник, посредством което се описва движението на индикатора в линейно филтрационно поле (Бочев е р, Орадoв с к а я, 1972 и др.):

$$(1) \quad C_{(x,t)} = \frac{M}{2\epsilon d l (\pi D t / n_0)^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - vt/n_0)^2}{4 D t / n_0} \right],$$

където $C_{(x,t)}$ е концентрацията на индикатора в наблюдателната точка, отстояща от пусковия сондаж на разстояние x за всеки момент от време t ; M — количеството индикатор, използвано по време на опита; d и l са диаметърът и дължината на филтъра на пусковия сондаж; ϵ е коефициентът на призабойната зона на същия; r , D и n_0 са скоростта на филтрация, коефициентът на филтрационна дифузия и активната порестост на пласта. От (1) се вижда, че максималната концентрация C_m в наблюдателната точка се получава при време $t_m = x n_0 / v$. След заместването на този израз за t_m в (1) и като се приеме $\epsilon = 2$ (за най-често срещания случай) и $D = \lambda v$ (λ е коефициент на хидродисперсията), се получава следният прост израз за оптималното количество индикатор, което трябва да се пусне с оглед достигането на предварително избрана максимална концентрация в наблюдателния сондаж в зависимост от фоновата концентрация на компонента:

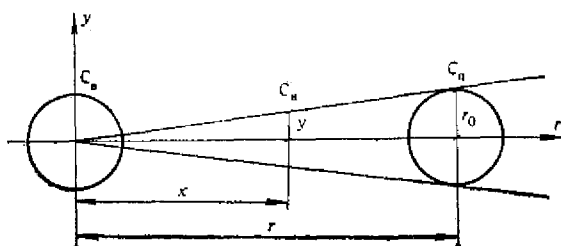
$$(2) \quad M = 7,1 d l C_m \sqrt{\lambda x}.$$

За коефициента на хидродисперсията с известен запас могат да се приемат следните ориентировъчни стойности: при пясъци $\lambda = 2 \div 3$ cm; при пукнатинно-карстова среда $\lambda = 20 \div 30$ cm и повече. Така например при $l = 400$ cm, $x = 600$ cm, $d = 30$ cm, $\lambda = 24$ cm количеството индикатор (например хлоридни йони), което трябва да се постави в пусковия сондаж, изчислено по (2) при зададена стойност на $C_m = 200$ mg/dm³, съставлява около 2 kg.

Ако използваният индикатор е електролит, неговата концентрация в наблюдателния сондаж обикновено се измерва индиректно — с резистивиметър (измерващ относителното съпротивление), или по метода на Сликхтер, при който се измерва силата на тока между пусковия и регистриращия сондаж. Нашият опит показва, че за определянето на миграционните параметри индиректното определяне на концентрацията е неподходящо, тъй като невинаги съществува линейна функционална връзка между силата на тока (относителното съпротивление) и концентрацията на индикатора. Това е особено важно при комбинираното пускане на няколко различни индикатора. Затова бихме препоръчали периодичното вземане на водни проби за химически анализ. Ако анализите се извършват в лаборатория, е нужно консервирането на пробите с антисептик (например с CHCl_3) за подтискане на биохимичните процеси. В много случаи привличането на различни химични и физични методи за целите на един и същ хидрохимичен анализ позволява да бъдат отстранени систематичните грешки при дадено определение, а оттам да се осигури и верността на изчислените параметри.

Методически особености при интерпретацията на изходните данни от миграционните опити в условията на водочерпене

При миграционните опити в условията на водочерпене изходната крива $C(t)$ в наблюдателния сондаж има характерен максимум и няколко инфлексни точки. Този характер на кривата се обуславя от дисперсията на индикатора и сорбирането му от средата. Кинетиката на сорбционните процеси съществено влияе и на формата на изходната крива, правейки я асиметрична. Движението на индикатора между пусковия и наблюдателния сондаж може с известно приближение да се опише от уравнение (1), като се въведе усреднената скорост на филтрация $v^* = k/l^*$ между C_n и C_n (фиг. 1). За намиране аналитичния израз на v^* е необходимо плоско-радиалното течение с променлива скорост да се приведе в еквивалентно по отношение на дебита в токовата лента равномерно линейно течение.



Фиг. 2
Fig. 2

При плоско-радиално течение (фиг. 2) водното количество в рамките на токовата лента, обхващаща C_n , преминаващо за единица време през произволно сечение x , се дава от функцията на тока (П о л у б а р и н о в а - К о ч и н а, 1977)

$$(3) \quad \psi = T \frac{H_r - H_x}{\ln(r/x)} \operatorname{arctg}(r_0/r),$$

където T е проводимостта на пласта, H_r и H_x са напорите в точките r и x . Ако трапецовидната форма на токовата лента се редуцира в еквивалентна по площ правоъгълна форма и скоростта на филтрация v^* се приеме за постоянна, дебитът в сечение x може да се изрази чрез уравнението на Дарси

$$(4) \quad Q = Tl^*(r_0 + x \operatorname{tg}(r_0/r)),$$

където изразът в скобите отразява средната ширина на трапецовидната токова лента. При равенство на дебитите в сечение x , т. е. $\psi = Q$, за средния напорен градиент в интервала $r-x$ се получава

$$(5) \quad I^* = \frac{H_r - H_x}{\ln(r/x)} \cdot \frac{\operatorname{arctg}(r_0/r)}{r_0 + x \operatorname{tg}(r_0/r)}.$$

При условие, че $r_0/r < 0,1$, формула (5) може да се опрости, като се замени $\operatorname{arctg}(r_0/r) = \operatorname{tg}(r_0/r) = r_0/r$. Тогава за средния напорен градиент се получава

$$(6) \quad I^* = \frac{2(H_r - H_x)}{(r+x) \ln(r/x)},$$

а за средната скорост на филтрация в интервала $r-x$

$$(7) \quad v^* = \frac{2k\Delta H_{(r,x)}}{(r+x)\ln(r/x)} = \frac{0,87k \cdot \Delta H_{(r,x)}}{(r+x)\lg(r/x)}.$$

Интерес представлява грешката, която би се допуснала, ако скоростта между C_{II} и C_{III} се изчислява вместо по (7) по формулата на Дарси за равномерно течение:

$$(8) \quad v = k \frac{\Delta H_{(r,x)}}{r-x}$$

Една съпоставка между (7) и (8) по процентната грешка при различни стойности на отношението r/x

$$\delta = \left(\frac{v}{v^*} - 1 \right) \cdot 100 = \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{(r/x)+1}{(r/x)-1} \ln(r/x) - 1 \right] \cdot 100 \%$$

показва, че при малки стойности на r/x грешката, която се допуска при изчисляването на скоростта по (8), е несъществена (фиг. 3), но при $r/x > 5 \div 6$ тя може да достигне значителни стойности — от порядъка на 30% и повече.

От формула (7) може да се получи още една проста зависимост за определяне на средната скорост на филтрация между пусковия и наблюдателния сондаж. Ако $\Delta H_{(r,x)}$ се изрази по класическата формула на Дюпюи

$$\Delta H_{(r,x)} = \frac{Q}{2\pi km} \ln(r/x)$$

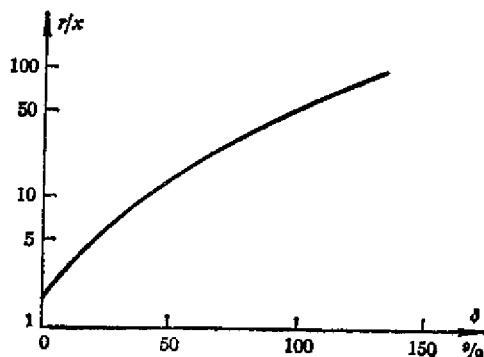
и се замести в (7), се получава формулата

$$(9) \quad v^* = \frac{Q}{\pi m(r+x)}.$$

Формула (9) е твърде удобна за предварителни изчисления при планирането на миграционния опит, тъй като не изисква познаването на коефициента на филтрация k , а само мощността на пласта m . При окончателната интерпретация на резултатите от опита обаче е редно да се използва формула (7), тъй като тя по-добре отчита анизотропността на водоносния пласт в различните направления.

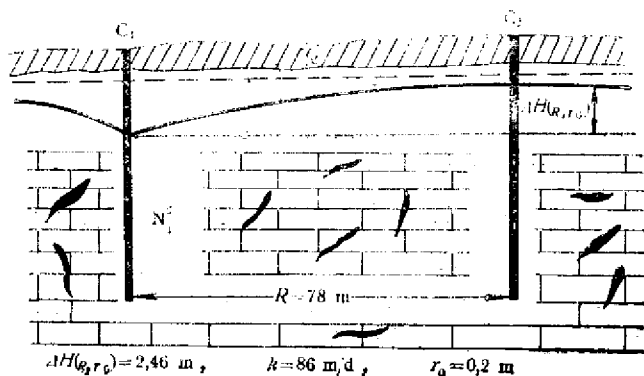
Въвеждането на израза за средната скорост v^* в интервала между пусковия и наблюдателния сондаж дава възможност при определянето на миграционните параметри в условията на водочерпене да се използват пряко методите, разработени за интерпретация на опитите в естествен поток на подземните води. Такива методи са подробно описани в специалната литература (Бочевер, Орадовская, 1972; Вергини и др., 1977 и др.). Поради това тук няма да се спираме на същността им, а само ще илюстрираме приложението на един от тях при определянето на параметрите за конкретен пример от практиката.

Пример. За илюстриране на методиката за провеждане и интерпретирание на миграционните опити в условията на водочерпене ще използваме данните от индикаторния опит, проведен с наше участие в района на Шабла.



Фиг. 3
Fig. 3

Хидрогеоложният профил, минаващ през сондажите на опитния участък, е показан на фиг. 4. Опитът протече при продължително стабилизирано водочерпене от сондаж C_3 . В качеството на пусков бе използван C_2 , а наблюденията за изменението на индикаторите се водеха във водочерпателния



Фиг. 4
Fig. 4

сондаж C_3 . Като индикатори бяха използвани хлоридни йони (Cl^-), получени от разтварянето на готварска сол, и двувалентни медни йони (Cu_{aq}^{2+}), получени от разтварянето на химически чист $CuSO_4 \cdot 5H_2O$. Първите порции от Cl^- бяха регистрирани в C_3 в началото на петия ден от пускането на индикатора в C_2 , а максималната концентрация бе измерена при време $t_m = 6,25$ d от началото на опита. Поради сравнително високия природен фон на Cl^- в района, голямото разстояние между C_2 и C_3 и при положението, че концентрациите се измерваха в самия водочерпателен сондаж (където разреждането на индикатора е твърде съществено), не се създаде възможност за по-точно дефиниране на цялата изходна крива $C(t)$ за хлоридните йони. Опитът продължи общо 40 дни, като ежедневно се вземаха по 6 водни проби за химически анализ и се извършваха качествени реакции за откриване на медните катиони. До края на опита концентрацията на Cl^- се колебаеше около фоновата стойност, а Cu^{2+} не бяха открити в изчерпваната от C_3 вода. Този факт може да се обясни с твърде високата сорбционна способност на сарматските варовици по отношение на медните йони. Така получените данни дават възможност за определяне само на активната порестост на средата по изходната крива на хлоридния йон. Последователността при извършване на изчисленията е следната:

определяне на средната скорост на филтрация между C_2 и C_3

$$v^* = \frac{2k\Delta H(R, r_0)}{(R+r_0)\ln(R/r_0)} = \frac{2 \cdot 86 \cdot 2.46}{(78+0.2)\ln(78/0.2)} = 0,915 \text{ m/d};$$

определяне на активната порестост на сарматските варовици по формулата (Бочев е р, О р а д о в с к а я, 1972)

$$n_0 = \frac{v^*}{R} t_m = \frac{0,915 \cdot 6,25}{78} = 0,073.$$

Заклучение

За определяне на миграционните параметри в полеви условия ефективно може да се използва схемата за провеждане на опита в условията на водо-черпене от единичен кладенец и пускане на индикатора в обсега на депресионната фуния. При проектирането на опитния участък, провеждането и интерпретирането на миграционния опит трябва да се имат пред вид следните особености:

— участъкът е целесъобразно да се състои поне от три сондажа, подредени в една линия: пусков — наблюдателен — централен; използването на централния сондаж като наблюдателен не се препоръчва поради нежелателното разреждане на индикатора вследствие радиалния приток в сондажа;

— количеството индикатор, което трябва да се пусне в хода на опита, ориентировъчно може да се определи по формула (2) в зависимост от конкретните хидрогеоложки условия и възможностите на използваната химико-аналитична методика;

— чрез въвеждането на средната скорост на филтрация $v^*(7)$ неравномерното радиално течение на подземните води в интервала между пусковия и наблюдателния сондаж се привежда към равномерно, което дава възможност при определянето на миграционните параметри да се използва методиката, разработена за опити в естествен поток на подземните води.

Л и т е р а т у р а

- Боcheвер, Ф. М., А. Е. Орадовская. 1972. *Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнений*. М., Недра.
- Веригин, Н. Н. и др. 1977. *Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород*. М., Недра.
- Мироненко, В. А., В. Г. Румынин, В. К. Учаев. 1980. *Охрана подземных вод в горнодобывающих районах*. Л., Недра. 1980.
- Полубаринова-Кочина, П. Я. 1977. *Теория движения грунтовых вод*. Изд. 2-е. М., Недра.
- Чураев, Н. В., Н. И. Ильин. 1973. *Радиоиндикаторные методы исследования движения подземных вод*. М., Атомиздат.
- Fried, J. J. 1975. *Groundwater pollution*. Amsterdam, Elsevier sci. publ. co.
- Slichter, C. S. 1905. *Field measurements of the rate of the movement of underground waters*. — US. Geol. Surv. Water Suppl. and Irrigation Paper.

Одобрена на 9. IV. 1979 г.

Accepted April 9, 1979

Some Particularities During Performing and Interpreting of Migration Tests in Situ

Pavel Penchev, Borislav Velikov

(С у м м а р у)

Some new treatments of indicator tests performing and interpreting in conditions of pumping from an isolated well (radially concentrating seepage flow) are considered. The most suitable scheme for disposition of the bore holes in

the experimental site is analysed, and a semi-empiric formula for determining of the optimum quantity of indicator which must be put in the bore hole of starting in dependence of the specific hydrogeologic conditions and possibilities for the chemical-analytical methods utilized is proposed. A mathematical expression for the average value of seepage velocity along the current lines in the range between the bore hole for starting and the utilized for control observations one is deduced. This gives the possibility to utilize directly the methods elaborated for experiments in a natural flow of ground waters (linear seepage flow) for interpretation of the issue data in conditions of pumping from the aquifer. The particularities of the methods proposed are illustrated by interpretation of the issue data from a migration experiment performed by the authors in the karst aquifer near Shabla town.