

Относно влиянието на „допълнителния приток“ върху възстановяването на нивата в наблюдателните сондажи

Михаил Гълъбов, Стефан Георгиев

Гълъбов М., Ст. Георгиев, 1974. О влиянии „дополнительного притока“, на восстановление уровня в наблюдательных скважинах. — *Инж. геология и гидрогеология*, 1, 41—49.

Уменьшение дополнительного (продолжающегося) притока является приблизительно экспоненциальным. Получен критерий времени ($t \geq 6,3/\gamma$), по истечении которого теоретическая и реальная кривая восстановления совпадают. Показано, что эффект продолжающегося притока проявляется в наблюдательных скважинах практически в тот же интервал времени как и в центральном колодце. Определение параметров пласта следует вести по участкам, кривых восстановления, для которых выполнено указанное условие времени. Параметр уменьшения притока (γ) определяется по восстановлению в центральном колодце.

Адрес: Болгарская академия наук, Геологический институт, София 1113.

Galabov M., St. Gueorgiev, 1974. Influence of the well storage on the recovery in observation wells. — *Engineering Geology and Hydrogeology*, 1, 41—49.

The inflow into pumping well after stopping the pumping is represented by an exponentially decreasing function. A criterion for determining the time after which the theoretical and real curves coincide is obtained ($t \geq 6,3/\gamma$). In practice, the influence of the well storage remains in one and the same interval both for data from observation and pumping wells. The parameter of the decreasing of well in flow is determined using recovery data in pumping well.

Address: Bulgarian Academy of Sciences, Geological Institute, Sofia 1113.

Действието на водочерпателните кладенци е съпроводено почти винаги от два ефекта, които обикновено не се третират в конвенционалната филтрационна теория на кладенците, разглеждаща ги като линейни стокове (източници). Това са: а) ефектът на допълнителните филтрационни съпротивления при стените на кладенеца, в резултат на които водното ниво зад стените се оказва значително по-високо от това в самия кладенец; б) ефектът на допълнителния водоприток в кладенеца след прекратяване на водочерпенето, свързан със запълването на ствола на самия кладенец.

Тези два ефекта са до голяма степен взаимно свързани и водят до това, че реалните криви на понижението и на възстановяването на нивото се отличават от теоретичните криви (на Тейс и др.). Първият ефект е предмет на множество изследвания, които тук не ще отбелязваме, тъй

като той не се разглежда в настоящата работа. Вторият ефект е коментиран в различни аспекти от някои автори (вж. цитираната литература).

Практическото значение на т. нар. „допълнителен приток“ е свързано главно с усложненията, които той внася при интерпретацията на кривите на възстановяване с оглед определянето на хидрогеоложките параметри на пласта. Без да се впускаме в подробности, ще напомним два добре известни извода, произтичащи от досегашните изследвания:

— Определянето на проводимостта на пласта T от кривата на възстановяване във водочерпателния кладенец може да се осъществи само на базата на крайните фази на възстановяването, когато реалната крива асимптотично клони към теоретичната.

— Точното определяне на коефициента на водоотдаване μ (респективно коефициента на нивопредаване a) е практически невъзможно по данните от водочерпателния кладенец.

Ето защо за цялостното определяне на параметрите на пласта се налага използването на наблюдателни сондажи, като се счита, че при тях горните ефекти не се отразяват съществено.

Нашата цел е да обърнем внимание, че в някои случаи допълнителният приток може да има осезаемо влияние и върху възстановяването на нивото в наблюдателните сондажи. Това са преди всичко случаите на водочерпене от шахтови кладенци в слабопроницаеми водоносни пластове.

Множеството наблюдения, които имаме, показват, че при такива кладенци поради значителните допълнителни съпротивления съществува голям „скок“ на нивото, достигащ до 60—70% от общото понижение в кладенеца. Така например изследваните кладенци в поройните конуси от долината на р. Сахел показаха, че при понижения в кладенците 10—15 m водното ниво зад техните стени остава на около 8—10 m над това в самите кладенци. В резултат на този скок, както и поради големия диаметър на кладенците (2—3 m) след прекратяване на водочерпенето се наблюдава интензивен допълнителен водоприток в продължение на часове. Тази продължителност е обусловена от сравнително слабата водопропускливост на пласта (заглинени чакъли) и от големия обем на ствола, който се запълва. При тези условия водното ниво в наблюдателните сондажи, изградени в съседство с водочерпателния кладенец, в течение на дълго време (от порядъка на часове) след прекратяване на водочерпенето продължава да спада.

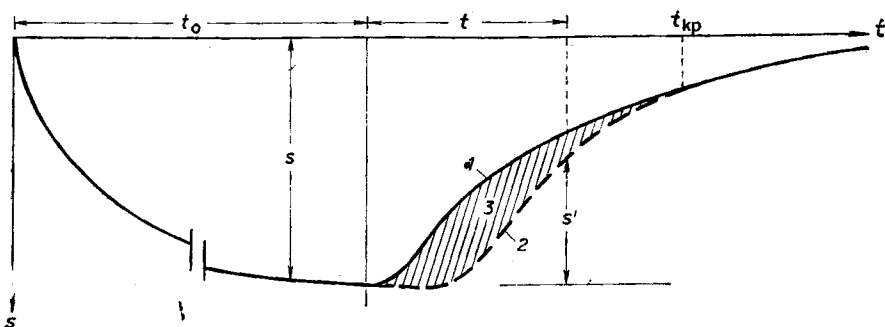
Принципиалният ход на възстановяване на нивото в наблюдателните сондажи при отсъствие и наличие на допълнителен приток е показан на фиг. 1. Реалната крива на възстановяване зависи от размера и изменението на допълнителен приток във времето. Той е най-голям веднага след прекратяването на водочерпенето и постепенно намалява — темпът на покачване на нивото във водочерпателния кладенец се забавя. При това водното количество, постъпващо в ствола на кладенеца във всеки момент t от спирането на водочерпенето, е $Q_g = \omega ds'/dt$ (s' е повишението на нивото в кладенеца; ω — напречното сечение на кладенеца).

Логично е следователно да се дефинира допълнителният приток посредством някаква отмираща функция на времето. Например Йотов (1972) предлага експоненциално изменение на Q_g от вида

$$(1) \quad Q_g = Q_0 \exp(-\gamma t).$$

Подобно заключение може да се направи и от изследванията на Шестаков и Пашковский (1967).

Могат да се допуснат, разбира се, и други закони на изменение на Q_g , но нашите наблюдения както върху споменатите кладенци от доли-



Фиг. 1. Криви на възстановяване на нивото в наблюдателен сондаж

1 — при отсъствие на допълнителен приток; 2 — при наличие на допълнителен приток; 3 — ефект на допълнителния приток

Fig.1. Courbes de remontée du niveau dans un forage d'observation

1 — en absence de post-production; 2 — en présence de post-production; 3 — effet de la post-production

ната на р. Сахел, така и върху редица кладенци в Софийската котловина и другаде показват, че експоненциалното изменение от типа (1) е твърде приемливо и съответствува добре на фактическото намаление на допълнителния приток Q_g .

В уравнение (1) Q_0 е дебитът на кладенеца в момента на прекратяване на водочерпенето. Коефициентът γ характеризира интензивността на изменение на допълнителния приток и зависи от диаметъра на кладенеца и от филтрационните свойства на пласта, като е пропорционален на проводимостта T (респективно на коефициента на пиезопредаване a) и е обратно пропорционален на сечението на кладенеца ω .

Ако водочерпенето е било достатъчно продължително, за да настъпи стабилизация на пониженията (или поне темпът на спадане да е вече много бавен), възстановяването на нивото в пласта — в условия на допълнителен приток, изменящ се в съответствие с (1) — се описва приближено от уравнението [1, 3]

$$(2) \quad s' = \frac{Q_0}{4\pi T} \left[W(u) - I\left(u, \frac{r}{B}\right) \right],$$

където

$$(3) \quad u = \frac{r^2}{4at}; \quad B = \sqrt{\frac{a}{\gamma}}.$$

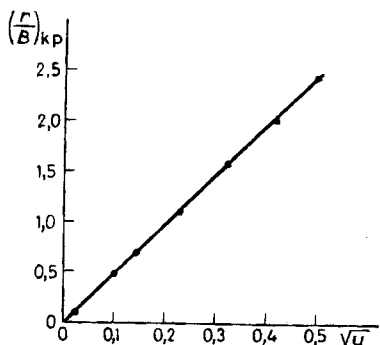
Означенията във формули (2) и (3) са: s' е покачването на нивото за време t от прекратяване на водочерпенето (фиг. 1); r — разстоянието до централния кладенец; $W(u) = -Ei(-u)$ — известната интегрална показателна функция; $I(u, r/B)$ — функция, получена и табулирана в [1] при

изследване на задача за действие на кладенец с експоненциално нарастващ дебит. Останалите означения бяха вече обяснени.

Уравнение (2) има валидност и тогава, когато при водочерпенето не е достигната стабилизация, но анализираният период на възстановяването е къс в сравнение с периода на водочерпене ($t \leq 0,1 \div 0,15 t_0$).

При отсъствие на допълнителен приток ($\gamma = \infty$ и $B = 0$) имаме $I(u, r/B) = 0$ и покачането на нивото се описва от общоизвестното уравнение на Тейс — линия 1 на фиг. 1.

В [3] са представени еталонни криви, построени върху уравнение (2). Същите са използвани от нас с цел да се намери критерий, характеризиращ времето, след изтичането на което реалната и теоретичната крива на възстановяване съвпадат. Изследвани са ония пределни („критични“) стойности на r/B , под които кривата, описвана от формула (2), се отличава вече от кривата на Тейс. Интерпретацията на резултатите е извършена в координатна система $(r/B)_{кр} \div \sqrt{u}$ (фиг. 2), в



Фиг. 2
Fig. 2

която зависимостта се оказва линейна. Следователно времето, след което ефектът на допълнителния приток е практически пренебрежим, може да се оцени от условието

$$(4) \quad \frac{r}{B} = c\sqrt{u},$$

където $c = \text{const}$ е наклонът на правата.

Определяйки c от фиг. 2 и изразявайки u и B според формули (3), получаваме следния прост критерий за времето, след което реалната и теоретичната крива ще съвпадат:

$$(5) \quad t \geq \frac{6,3}{\gamma}.$$

Вижда се, че времето, в течение на което допълнителният приток влияе върху кривите на възстановяване, зависи от интензивността на изменение на притока (от параметъра γ). При по-високи стойности на γ , т. е. при висока проводимост на пласта и малък диаметър на кладенеца това време е твърде кратко и, обратно, при голям диаметър на кладенеца и ниска проницаемост на пласта — то може да бъде значително. При $\gamma = \infty$ (респективно $Q_g = 0$) имаме $t \geq 0$, т. е. теоретичната крива е валидна веднага след прекратяване на водочерпенето, което означава еквивалентност на кладенеца с един линеен сток с безкрайно малък радиус.

Практически изводи, които могат да се направят въз основа на получения критерий, са: а) влиянието на допълнителния приток се проявява и при наблюдателните сондажи в почти същия интервал от време, както и при водочерпателните; б) за изчисляване на хидрогеоложките параметри

на пласта по наблюдателни сондажи следва да се използват ония етапи (или онзи праволинеен участък), за които е изпълнено условие (5).

За правилния избор на разчетния интервал от време е необходимо следователно да се знае γ . Определянето на този параметър може да се осъществи лесно по данните от възстановяването на нивото в самия водочерпателен кладенец при следната последователност:

— Определя се в няколко момента от възстановяването притока: $Q_g = \omega \Delta s' / \Delta t$, като $\Delta s'$ е покачването на нивото за отделен „елементарен“ отрязък от време Δt (например една минута).

— Строи се зависимостта $\lg Q_g = f(t)$. Ако изменението на Q_g съответствува на истина на формула (1), тази зависимост следва да бъде праволинейна — вж. примера на фиг. 3. Получената права има наклон $i = \gamma/2, 3$ и отсича от ординатната ос $\lg Q_0$. От нея определяме наклона

$$i = \frac{\lg Q'_g - \lg Q''_g}{t'' - t'} = \frac{\lg (Q'_g / Q''_g)}{t'' - t'}$$

— Параметърът γ се изчислява така

$$(6) \quad \gamma = 2,3i$$

В качеството на пример ще приведем анализа на възстановяването в кладенец К-61 и съседния нему наблюдателен сондаж С-5, разположен на 17 м от К-61. Кладенецът е с диаметър 2 м и е изграден в пролувиалните конуси, образуващи северния склон на долината на р. Сахел. В края на водочерпенето понижението в К-61 е съставлявало 10,9 м, а това в С-5 — само 0,45 м. Това вече подсказва големите загуби на напор при стените на кладенеца (той има много малка надупченост), които са потвърдени и от видимия приток на вода, идващ през стените на кладенеца високо над водното ниво в него в процеса на възстановяването.

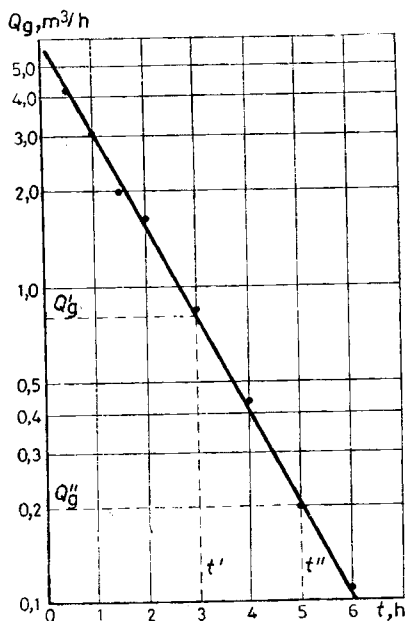
На фиг. 3 е представена зависимостта $\lg Q_g = f(t)$ за кладенец К-61. Праволинейността ѝ е много добре подчертана, което потвърждава приетия експоненциален характер на допълнителния приток. Наклонът на правата е

$$i = \frac{\lg (0,80/0,20)}{5-3} = 0,301 \text{ h}^{-1}$$

Параметърът γ определяме от (6):

$$\gamma = 2,3 \cdot 0,301 = 0,7 \text{ h}^{-1}$$

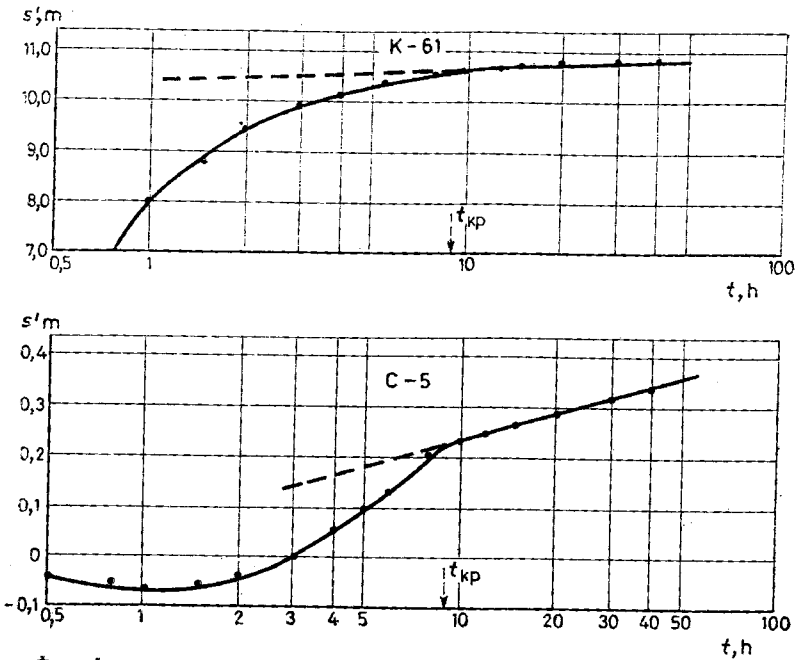
Времето, след което реалната и теоретичната крива ще съвпадат в съответствие с условие (5), е



Фиг. 3
Fig. 3

$$t \geq \frac{6,3}{0,7} = 9 \text{ h.}$$

Този интервал от време е красноречиво изразен върху кривите на възстановяване в К-61 и С-5. Обработката им в обичайната координатна



Фиг. 4
Fig. 4

система $s' - \lg t$ (фиг. 4) показва ясно онзи момент, след който ефектът на допълнителния приток се изчерпва, както и праволинейният участък, който следва да се използва за изчисляване параметрите на пласта. Върху графиката на С-5 се вижда продължаващото спадане на нивото известно време след водочерпенето. Продължителността на „дефектния“ период е приблизително еднаква за К-61 и С-5, което е в съответствие с получения критерий (5), независещ от разстоянието до наблюдателния сондаж.

Един втори пример е показан на фиг. 5. Изследван е допълнителният приток в един шахтов кладенец, изграден в алувиалните отложения (заглинени чакъли и пясъци) на р. Сливнишка в западната част на Софийското поле.

Зависимостта $\lg Q_g \div t$ е също праволинейна, т. е. и тук експоненциалното изменение на Q_g е налице. Наклонът на правата е

$$i = \frac{\lg 50 - \lg 25}{33 - 19} = 0,0214 \text{ min}^{-1}.$$

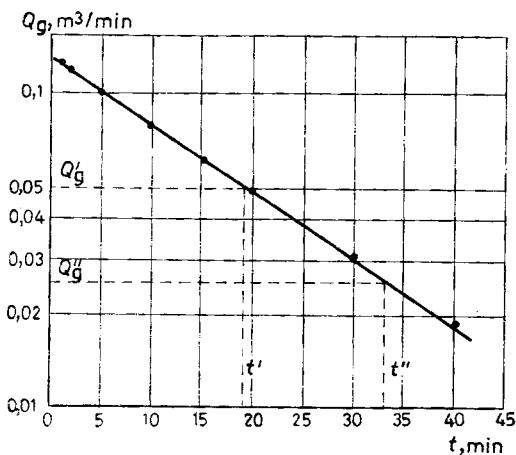
За γ имаме

$$\gamma = 2,3 \cdot 0,0214 = 0,0493 \text{ min}^{-1} = 3 \text{ h}^{-1}.$$

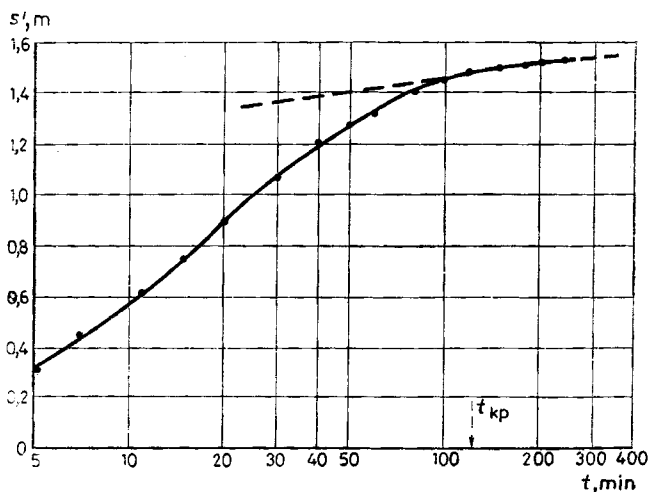
Времето, след което ефектът на допълнителния приток ще е пренебрежим, е

$$t \geq 6,3/3 = 2,1 \text{ h.}$$

С други думи, около два часа след прекратяване на водочерпенето този ефект ще е вече незначителен и едва тогава ние можем да използваме кривите на възстановяване за надеждно определяне хидрогео-



Фиг. 5



Фиг. 6

ложките параметри на пласта. Обработената крива на възстановяване ($s' - \lg t$) на фиг. 6 потвърждава това.

В заключение ще отбележим, че понякога изменението на допълнителния приток може да бъде апроксимирано с функция от друг тип, а

не експоненциална, например параболична, хиперболична и др. В такива случаи ще е по-целесъобразно вместо функцията $I(u, r/B)$ да се използва по-общата функция $G^*(u, \varphi, \beta)$, получена от нас в [2] и обобщаваща няколко типа изменение на дебита, в това число и експоненциалното. За тази цел ще е необходимо да се съпоставят съответните еталонни криви и да се търсят произтичащите от там критерии за времето на проявление на допълнителния приток. Подчертаваме обаче, че това би се наложило сравнително рядко, защото за болшинството случаи експоненциалното изменение ще е добра практическа апроксимация на този допълнителен приток.

Литература

1. Бочевър, Ф. М. 1968. *Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод*. М. Недра.
2. Гълъбов, М. 1974. Действие скважин с непрерывно изменяющимся дебитом. — *Сп. Бълг. геол. д-во*, № 3.
3. Йотов, Ил. 1972. Определяне хидрогеоложките параметри с отчитане на притока във водочерпателните кладенци при възстановяване на водното ниво. — *Хидротехн. и мелиор.*, 8.
4. Требин, Ф. А., Г. В. Щербakov, В. П. Яковлев. 1965. *Гидромеханические методы исследования скважин и пластов*. М., Недра.
5. Чернов, Б. С., М. Н. Базлов, А. И. Жуков. 1960. *Гидродинамические методы исследования скважин и пластов*. Гостоптехиздат.
6. Шестаков, В. М., И. С. Пашковский. 1967. Анализ режима восстановления уровня в скважине. — *Вопр. определения гидрогеол. парам. и расч. эксплуат. запасов подз. вод*, 1.
7. Bonnet, M., P. Ungemach, P. Suzanne. 1967. Interprétation des essais de pompage en régime transitoire. L'effet de puits et la post-production. — *Bull. du BRGM*, 12.
8. Jetel, J. 1967. Zásady interpretace výsledku stoupacích zkousek v hydrogeologické praxi. — *Geol. průzkum*, 12.
9. Miller, C. C., A. B. Dyes, C. A. Hutchinson. 1950. The estimation of permeability and reservoir pressure from bottom hole pressure build-up characteristics. — *The Petrol. Technology*, 2.
10. Paradopoulos, I. S., H. H. Cooper. 1967. Drawdown in a well of large diameter. — *Water Res. Res.*, 20, 69.

Одобрена на 15. XI. 1974 г.

Accepted November 15, 1974.

Influence de la post-production sur la remontée du niveau dans les forages d'observation

Mihail Galabov, Stephan Gueorguiev

(Résumé)

L'effet de la post-production est clairement manifesté dans les puits à large diamètre implantés dans des nappes aquifères peu perméables. A cause de lui, les parties initiales des courbes de remontée sont fortement déformées.

Le débit supplémentaire (la post-production) décroît suivant, à peu près, une allure exponentielle: $Q_{\text{sup}} = Q_0 \exp(-\gamma t)$, où Q_{sup} c'est la post-production au moment t après l'arrêt du pompage; γ — paramètre de décroissance de la post-production [temps⁻¹].

La comparaison de l'équation de remontée comprenant une post-production exponentielle avec l'équation théorique de Theis permet à obtenir un critère du temps depuis lequel les courbes théorique et réelle coïncident:

$$t \geq \frac{6,3}{\gamma} \quad (+)$$

Deux conclusions essentielles en résultent:

a) L'effet de la post-production apparaît à la remontée dans les forages d'observation pratiquement dans le même laps de temps que dans les puits de pompage.

b) L'évaluation des paramètres hydrogéologiques de la nappe (T, S) devrait se référer aux intervalles de temps, pour lesquels la condition (+) est accomplie.

Le paramètre de décroissance de la post-production γ est facilement déterminable d'après la remontée au puits de pompage. Dans un système de coordonnées $t \div \lg Q_{\text{sup}}$ il est défini par la pente de la droite représentative.

Deux exemples d'application sont présentés afin d'illustrer l'effet de la post-production sur les piézomètres et la validité du critère obtenu.