

УДК 556.343.24:622.841.3:622.272.5

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СВЯЗИ С ОХРАНОЙ ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

Е.А.ЛОМАКИН, А.С.МИРОНОВ

В настоящее время значительные запасы полезных ископаемых в недрах законсервированы в предохранительных целиках под водными объектами — поверхностными водоемами и водотоками, и мощными водоносными горизонтами. Например, в основных угольных бассейнах страны законсервировано до 10 % балансовых запасов угля [2]. Вопросы сокращения этих потерь тесно связаны с задачами охраны окружающей среды и оптимальный вариант комплексного решения этой проблемы имеет большое народнохозяйственное значение.

Внемка сырья под водными объектами нарушает равновесие природных условий в результате сдвижения горных пород, вызывает дренирование подземных и поверхностных вод горными выработками и оседание земной поверхности. Для прогнозирования вредного воздействия подземных горных выработок на подрабатываемые водоносные горизонты необходимо проведение исследований, включающих в себя оценку высоты зоны водопроводящих трещин (ЗВТ) над выработанным пространством и изучение гидрогеологических параметров водоносных комплексов и разделяющих их слабопроницаемых отложений, гидрогравитически связанных с ЗВТ.

Очевидно, что высота ЗВТ, возникающей в процессе разработки, служит основным критерием действительной безопасной глубины подработки и условий охраны водных объектов, поэтому оценка этого параметра является наиболее важной операцией при определении области влияния очистных горных работ на режим поверхностных и подземных водземов.

Общепризнано, что для определения высоты ЗВТ наиболее надежными являются натурные гидрогеологические методы исследований [4], основанные на наблюдениях за уровнями (напорами) подземных вод с помощью открытых наблюдательных пьезометров. Однако практика показала, что все они малоэффективны, а часто и непригодны при исследованиях подрабатываемых толщ, в геологическом разрезе которых существенно представлены слабопроницаемые мягкие и слаболигифицированные глинистые породы. Это связано с тем, что открытый наблюдательный пьезометр в силу своей инерционности^х яв-

^х Под инерционностью здесь понимается запаздывание изменения уровня в пьезометре относительно изучаемого пласта, вызванное влиянием емкости и координат пьезометра.

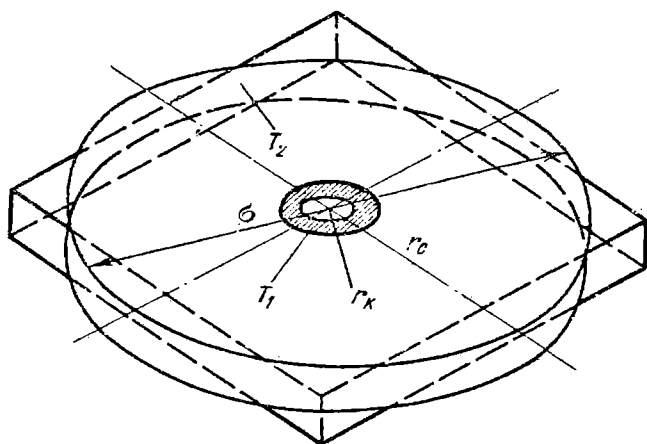


Рис.1. Расчетная гидродинамическая схема к исследованию закономерностей снижения уровня в открытом пьезометре

ляется источником погрешностей, мешающих правильно оценить гидродинамическую обстановку в толще горных пород, особенно при его оборудовании на слабопроницаемые отложения.

Для изучения возможности использования открытых пьезометров в качестве средства контроля напоров при определении ЗВТ в подрабатываемых толщах с преимуществен-

ном развитием слабопроницаемых пород, нами был проведен цикл численных экспериментов. Исходные позиции для схематизации гидрогеологических условий подработки следующие [5]:

1) расстояние между трещинами сдвижения, которые образуются при каждом шаге обрушения основной кровли, около 15-20 м;

2) вертикальные (нормальноосекущие) трещины сдвижения образуются преимущественно параллельно и перпендикулярно линии очистного забоя;

3) вертикальные трещины сдвижения образуются по периметру выработанного пространства, т.е. максимальные расстояния между нормальноосекущими трещинами равны шагу обрушения для трещин, параллельных очистному забою, и ширине выработки (длине лавы) для трещин, перпендикулярных очистному забою;

4) ввиду характерной профильной анизотропии слабопроницаемых (глинистых) пластов, отток воды из пьезометров идет, в основном, вдоль напластования.

Эти положения позволяют свести задачу к исследованию закономерностей снижения уровня в пьезометре при использовании следующей расчетной схемы: пьезометр расположен в элементарном плоском цилиндре, диаметр которого равен расстоянию между трещинами σ , когда расстояния между различно ориентированными по отношению к линии забоя трещинами соизмеримы между собой (рис.1). В этом случае для нахождения искомой функции понижения можно сформулировать следующую краевую задачу одномерной осесимметричной фильтрации:

$$\mu \frac{\partial}{\partial t} S_1(r, t) = \frac{T_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial S_1(r, t)}{\partial r} \right]; \quad r_c \leq r \leq r_k;$$

$$\mu \frac{\partial}{\partial t} S_2(r, t) = \frac{T_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial S_2(r, t)}{\partial r} \right] \quad r_k \leq r \leq l;$$

где μ - водоотдача пласта; t - время, отсчитываемое с момента обработки водного объекта t_0 ; S_1 - понижение в пределах закольматированной зоны; T_1 - водопроводимость закольматированной зоны; r_c - радиус наблюдательного пьезометра; r_K - радиус внешней границы зоны кольматации; S_2 - понижение в пласте вне зоны кольматации; T_2 - водопроводимость пласта; l - расстояние от скважины до трещины, $l = \sigma/2$; S_i - понижение уровня в скважине.

Численное моделирование проводилось на основе явно-неявной консервативной однородной экономичной разностной схемы [8]. В качестве параметров исследуемого поля фильтрации принимались характерные для разрезов опытных участков в натурном эксперименте: коэффициент водопроводимости 10^{-2} и 10^{-3} м²/сут; упругая водоотдача $\mu = 10^{-2}$.

Для моделирования емкости скважины в первом блоке значение водоотдачи μ_c принималось равным единице. Кольматация скважины сводилась к плановой неоднородности и реализовалась через второй блок. В качестве характерных значений, по данным публикаций [3, 6], были приняты следующие величины параметров зоны кольматации: толщина зоны $m = 0,05$ м, коэффициент водопроводимости $T_1 = 10^{-5}$ м²/сут.

При принятых значениях параметров поля фильтрации T_2 и μ определялись понижения напора в центре рассматриваемой области в следующих вариантах:

- 1) при отсутствии скважины (измерялись точные значения понижений S_T);
- 2) в незакольматированной скважине, когда влияет только ее емкость S_e ;
- 3) при наличии кольматации (неоднородности) вокруг центра поля фильтрации, но без учета емкости скважины, когда влияет только кольматация S_K ;
- 4) в закольматированной скважине с учетом ее емкости S_{eK} .

Результаты моделирования показали, что закольматированные наблюдательные скважины, обладающие конечной емкостью, в слабопроницаемых породах весьма инерционны и дают большую погрешность в замере понижения напора в течение нескольких десятков суток. Если принять, что в верхней части ЗВТ, которая нас в первую очередь и интересует, величина шага обрушения в среднем составляет 15-20 м, а средняя скорость продвижения очистного забоя равна 1 м/сут, то трещины движения должны образовывать-

оя здесь через каждые 15–20 сут; при этом важно, что в момент образования новой трещины стенки предыдущей имеют тенденцию к смыканию. Таким образом, использовать в этих условиях открытые пьезометры нецелесообразно. Даже если по открытым пьезометрам здесь и будет зафиксировано какое-то незначительное снижение уровня (напора) в подрабатываемых слоях, то однозначная интерпретация этой реакции мало вероятна.

Другим вопросом, возникающим при анализе вредного влияния горных работ на охраняемый водоносный горизонт, является оценка гидрогеологических параметров слабопроницаемой разделяющей толщи, которые, как известно, определяются на основе опытно-фильтрационных работ. Не останавливаясь здесь на вопросах постановки и интерпретации откачек в этих условиях, отметим лишь, что для определения расчетных параметров необходим замер напоров в пределах перекрывающего слабопроницаемого слоя.

С целью количественной оценки влияния инерционности открытых наблюдательных пьезометров на точность определения гидрогеологических параметров нами аналитическим и численным методами решалась задача о динамике снижения уровня в закольматированном пьезометре, имеющем конечную (реальную) емкость. При этом двумерная в плане задача схематизировалась в виде одномерной осесимметричной; на стенке пьезометра задавался соответствующий закон снижения уровня. Такая одномерная задача решалась численно методом прогонки по неявной конечно-разностной схеме [7] и аналитически методом интегральных соотношений Г.И. Баренблатта [1]. Как известно, последний метод предполагает использование некоторых упрощающих предположений, правомерность которых проверялась нами также на основе численного моделирования.

При использовании метода интегральных соотношений были сделаны следующие, физически достаточно очевидные, допущения:

1) зоны влияния возмущающей $l_1(t)$ и наблюдательной $l(t)$ скважин конечны, причем $l_1(t) \gg l(t)$;

2) отток воды из наблюдательной скважины имеет одномерный (плоско-радиальный) характер;

3) в закольматированной (присыважинной) зоне режим фильтрации жесткий.

Следовательно, для определения разницы понижений ΔS в пласте и пьезометре можно сформулировать следующую краевую задачу:

$$\frac{\partial \Delta S(r, t')}{\partial t'} = \frac{a^*}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial \Delta S(r, t')}{\partial r} \right]$$

$$\text{при } t' = 0 \quad \Delta S(r, t') = 0;$$

$$\text{при } t' > 0 \quad \Delta S(r, t') \Big|_{r=l(t')} = 0; \quad \frac{\partial \Delta S(r, t')}{\partial r} \Big|_{r=l(t')} = 0;$$

$$r_c^2 [S_T(R, t) - \Delta S(r, t')] = 2\mu \int_{r_c}^{l(t')} \Delta S(r, t') r dr;$$

$$\Delta S_1(r, t') \Big|_{r=L} = \Delta S_2(r, t') \Big|_{r=L}$$

$$T_1 \frac{\partial S_1(r, t')}{\partial r} \Big|_{r=L} = T_2 \frac{\partial S_2(r, t')}{\partial r} \Big|_{r=L},$$

где r – расстояние от наблюдательного пьезометра до любой точки пласта, причем $r \leq l(t')$; t' – время, отсчитываемое от момента начала снижения уровня в пласте t_0 на расстоянии R от возмущающей скважины, $t_0 = R^2 / 12 a^*$; a^* – коэффициент пьезопроводности; $S_T(R, t)$ – понижение в пласте в месте расположения наблюдательной скважины; t – время с начала откачки; L – расстояние от центра скважины до внешней границы зоны кольматации.

Решение поставленной задачи с учетом принятых допущений можно представить в виде

$$\frac{\Delta S}{S_T} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda \mu}{6 \left[0,5 \ln \lambda \frac{r_c^2}{L^2} - 1 + \frac{T_2}{T_1} \ln \frac{L}{r_c} \right]}}$$

где λ – безразмерное время,

$$\lambda = \frac{12 a^* S_T(R, t)}{r_c^2 \frac{d S_T(R, t)}{d t}},$$

для условий напорного изолированного пласта, вскрытого совершенной наблюдательной скважиной,

$$\lambda = \frac{-12 a^* t E_i \left(-\frac{R^2}{4 a^* t} \right) l^{-\frac{R^2}{4 a^* t}}}{r_c^2}.$$

Точность полученного аналитического решения проверялась с помощью численного моделирования соответствующей разностной задачи. При этом установлено, что предложенное решение позволяет определить величину $\Delta S(R, t)$ с точностью до 2–3 %, начиная с моментов времени, отвечающих $\Delta S(R, t) / S_T \leq 0,8-0,85$.

Анализ полученной зависимости показывает, что в пределах интервала времени $t_{\min} = 10 \frac{\omega}{T_2} (1 + 0,6 \frac{T_2}{T_1} \ln \frac{L}{r_c})$ (здесь ω – площадь поперечного сечения скважины) применение стандартных методов обработки откачек влечет за собой существенные погрешности в определении искомых параметров. При оценке параметров протекания в слабопроницаемых пластах с коэффициентом фильтрации меньше 10^{-3} м/сут время $t_{\min}$ может составлять 20–30 сут и более. В этом случае открытые пьезометры при откачках обычной продолжительности вообще непригодны.

Для иллюстрации влияния фактора инерционности наблюдательных скважин на точность определения гидрогеологических параметров и требуемую продолжительность кустовых откачек моделировались следующие условия:

1) откачка с постоянным расходом $Q = 1256$ м³/сут ведется из водоносного горизонта, имеющего водопроницаемость $T_2 = 10$ м²/сут и водоотдачу $\mu_2 = 10^{-2}$;

2) снижение уровня в процессе откачки фиксируется по наблюдательной скважине, расположенной на расстоянии $R = 12,65$ м от центральной и имеющей конечные диаметры 10^{-4} и $0,1$ м;

3) толщина закольматированной зоны $m = 0,02$ м, ее водопроницаемость $T_1 = 10^{-2} \div 10^{-5}$ м²/сут.

Анализ данных моделирования показывает, что инерционность закольматированных открытых пьезометров существенно сказывается на точности опре-

деления гидрогеологических параметров, зная значения T и a^* и зная μ . При этом если мы ошибаемся в оценке водопроницаемости в несколько раз, то в определении уровня неводности можно ошибиться на порядок и более.

Попутно стоит отметить, что метод обработки Джейкоба обладает важным преимуществом перед методом типовой кривой, поскольку при использовании последнего на величину искомых параметров существенно влияет динамика снижения напора в начальный период откачки, отражающая собой емкость и кольтмацию наблюдательного пьезометра. Важно, наконец, что незакольтмированная скважина реального диаметра и, в равной мере, закольтмированный пьезометр, который практически не имеет емкости, дают точные значения параметров, начиная с начальных этапов откачки. В нашем случае диаметр скважины, равный 10^{-4} м, соответствует максимальной емкости датчика порового давления. Поэтому если есть возможность исключить емкость как один из факторов, обуславливающих инерционность открытых пьезометров, то можно заметно снизить требования к качеству промывки и разглинзации скважины.

Итак, информативность опытных гидрогеологических работ можно значительно повысить, если исключить или свести к минимуму роль одного из двух факторов инерционности открытых пьезометров: емкости наблюдательной скважины или кольтмации ее прифильтовой зоны. Наиболее реальным в настоящее время представляется использование системы измерений уровня подземных вод, обладающей пренебрежимо малой, по сравнению с открытыми пьезометрами, емкостью и, вместе с тем, обеспечивающей точность замера в соответствии с запросами современной гидрогеологической практики.

Примером малоинерционных приборов, позволяющих с незначительной погрешностью фиксировать внешнюю нагрузку в натурных условиях, могут служить струнные тензострические устройства [4]. Так, например, емкость датчика порового давления конструкции ВНИИ при предельном расчетном давлении 0,5 МПа равна не более $0,35 \text{ см}^3$, что примерно соответствует расчетному радиусу открытого пьезометра $5 \cdot 10^{-5}$ м. Численное моделирование подтвердило, что такие системы замера уровня подземных вод при гидрогеологических исследованиях на обрабатываемых территориях могут с успехом применяться даже при больших значениях дополнительных сопротивлений $\Phi_{\text{доп}} = \frac{T_2}{T_1} \ln \frac{L}{r_c} \approx 10^6$.

К примеру, использование малоинерционных пьезометров, оборудованных датчиками порового давления, позволило оценить ЗВТ на одном из пластовых месторождений. В слабопроницаемой глинистой толще, разделяющей вынимаемый пласт и охраняемый водоносный горизонт, были установлены пять датчиков порового давления (рис.2). Полученные данные показывают, что ЗВТ пересекла слои пород, в которых расположены датчики Д1 и Д2, а ее верхняя граница находится между датчиками Д2 и Д4, т.е. на высоте не более 30-35 м над кровлей разрабатываемого пласта, и, следовательно, она не достигает нижнего контура разрабатываемого водоносного горизонта.

В методическом плане основные результаты данного исследования сводятся к следующему:

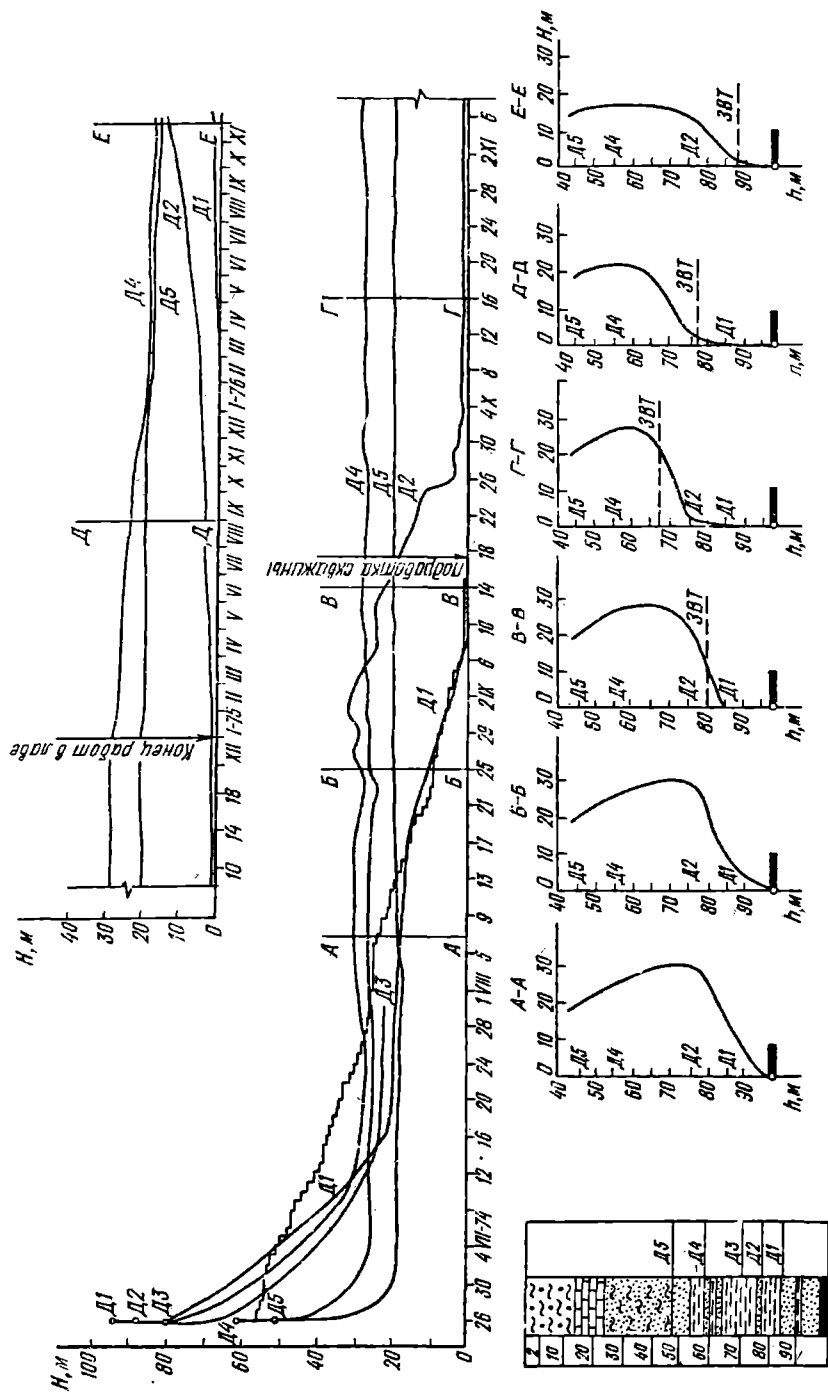


Рис.2. Результаты наблюдений по датчикам порового давления Д1-Д5
 H — напор, м; h — глубина от устья скважины

1. На основе аналитических и численных методов доказана недопустимость применения открытых пьезометров при решении задач подработки водоносных горизонтов.

2. С использованием тех же методов показано, что при проведении СЭР с целью определения параметров слабопроницаемых отложений использование данных по открытым пьезометрам может быть причиной существенных погрешностей в расчетных параметрах.

3. Для устранения указанных эффектов рекомендуется использовать малоинерционные пьезометры, позволяющие вести замеры напоров даже в слабопроницаемых отложениях.

В практическом плане проведенные исследования позволили обосновать такие условия отработки месторождения, при которых не происходит истощения охраняемого водоносного горизонта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблат Г.И. О некоторых приближенных методах в теории одномерной неуставившейся фильтрации жидкости при упругом режиме. - Изв. АН СССР, сер. ОТН, 1954, № 9, с. 31-35.
2. Безопасная выемка угля под водными объектами / Под ред. Б.Я. Гавришмана. М., Недра, 1977. 176 с.
3. Гаврилко В.М., Алексеев В.С. О некоторых результатах вскрытия фильтров скважин горизонтальными выработками. - Разведка и охрана недр, 1965, № 6, с. 12-14.
4. Гидрогеологические исследования в горном деле / Под ред. В.А. Мироненко. М., Недра, 1976. 352 с.
5. Глушихин Ф.П. Трудноуправляемые кровли в очистных забоях. М., Недра, 1974. 123 с.
6. Кузмичев Д.Н., Тосунов Э.М. Изменение проницаемости прифилтровой зоны пласта в процессе эксплуатации скважин. - Нефтяное хозяйство, 1961, № 4, с. 38-41.
7. Ломакин Е.А., Мироненко В.А. Исследование оптимальных схем математического моделирования геофильтрационных задач. - Всесоюзный семинар по вопросам моделирования процессов подземных вод. Тезисы докладов. М., изд. Центр. правл. НТГО, 1978, с. 9-14.
8. Самарский А.А. Теория разностных схем. М., Наука, 1977. 656 с.