

УДК 556.388:621.039.7

© 1998

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ
В АНИЗОТРОПНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ
(Часть II. Определение тензора коэффициента фильтрации)**

*Е.Г. Дрожко, П.М. Стукалов
Россия, Озерск, ПО «Маяк»*

О.Н. Александрова

Россия, Озерск, Озерский технологический институт МИФИ

Л.М. Самсонова, А.В. Глаголев

Россия, Москва, ГПИ Гидроспецгеология

В статье представлены результаты расчета тензора коэффициента фильтрации по данным поинтервальных откачек куста скважин в районе р.Мишеляк. В основу расчета положено аналитическое решение задачи водопроводимости для анизотропной однородной среды с постоянным во времени гидравлическим напором на границе, полученное Hsieh P.A. и Neuman S.P. [1]. Анализ данных откачек по различным методикам показал, что в первом приближении исследуемую толщу можно рассматривать как однородную среду. При обработке графиков временного прослеживания гидравлического напора в интервалах наблюдения было установлено, что использование метода эталонных кривых для обработки результатов измерений, как предлагается в [1], не является возможным вследствие деформации типовых эталонных закономерностей в условиях реального эксперимента. Это привело к необходимости создания новых методов обработки кривых депрессии. Авторами были разработаны и применены для вычисления параметров математической модели [1] два метода обработки кривых депрессии. Используя эти методы, были построены тензоры коэффициентов фильтрации при возмущении различных интервалов водоносного горизонта. Анализ компонент тензора коэффициента фильтрации показал, что рассматриваемая водовмещающая толща может быть представлена в виде трех слоев с различными фильтрационными свойствами. Для осредненной водопроводимости наблюдается преобладание вертикального направления. Сравнение рассчитанных коэффициентов фильтрации с результатами расчетов, выполненных в работе [2], показало, что модель [1], дополненная новыми методами обработки данных, может быть использована при решении задачи фильтрации подземных вод в районе р.Мишеляк.

Решение задачи фильтрации подземных вод в районе р.Мишеляк обусловлено необходимостью оценки прогноза продвижения и разгрузки в реку загрязненных подземных вод от хранилища жидких радиоактивных отходов ПО «Маяк» – оз.Карачай. В 1996 г. было проведено мультипакерное опробование скважин 1/96, 2/96, 176, расположенных к северу от р.Мишеляк. Основные результаты выполненных экспериментальных работ изложены в

первой части статьи [2]. Скважина 1/96 являлась центральной скважиной, из которой поинтервально (интервалы А–G) откачивалась вода. В интервалах скважин 2/96 и 176 (А–G) проводились наблюдения падения напора воды в течение откачки. Геометрия эксперимента показана на рис. 1.

Используя данные кустовой откачки, были построены кривые депрессии для каждого интервала наблюдения. По кривым деп-

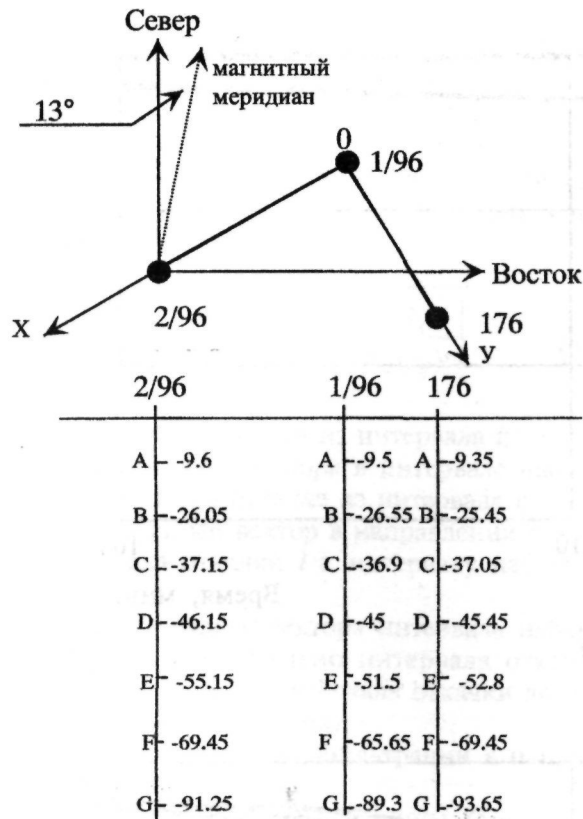


Рис.1. Схема расположения куста скважин. Вверху – горизонтальная проекция (в плане). Внизу – вертикальные разрезы, цифры на осях соответствуют центрам изолированных интервалов (в метрах).

рессии определялись параметры режима фильтрации в предположении анизотропной среды. В работе [1] эти параметры – пьезопроводность и отношение объема эллипсоида фильтрации к значению коэффициента фильтрации в заданном направлении – определялись методом эталонных кривых. Однако этот метод имеет существенный недостаток: погрешность определения параметров определяется степенью совмещения эталонной и экспериментальной зависимостей. Если не уда-

ется добиться удовлетворительного совмещения, что достаточно часто имеет место в условиях реального эксперимента (из-за отклонений опытных закономерностей от эталонных под воздействием различных факторов), то дальнейшая интерпретация полученных результатов становится невозможной [3]. Для обработки кривых депрессии авторами были разработаны два метода определения указанных параметров. Разработанные методы учитывают, что особенности строения среды и фильтрации в ней жидкости приводят к искажению типовой формы графиков прослеживания изменения напора. Первая методика (приложение А) использовалась для обработки кривых депрессии с резким скачком напора в наблюдательных скважинах при начале откачки. Соответствующие экспериментальные зависимости приведены на рис. 2а. Вторая методика (приложение Б) разработана для вычисления параметров математической модели по начальному периоду квазистационарного режима до вырождения кривой (рис. 2б).

Математическая модель [1] и возможности ее реализации в эксперименте с мультипакерным опробованием скважин 176, 1/96 и 2/96 при поинтервальной откачке

Пространственная фильтрация для однородной анизотропной среды описывается уравнением:

$$\vec{\nabla} \cdot K \vec{\nabla} h = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

где $h=h(x, y, z)$ – функция гидравлического напора для рассматриваемого потока;

t – время;

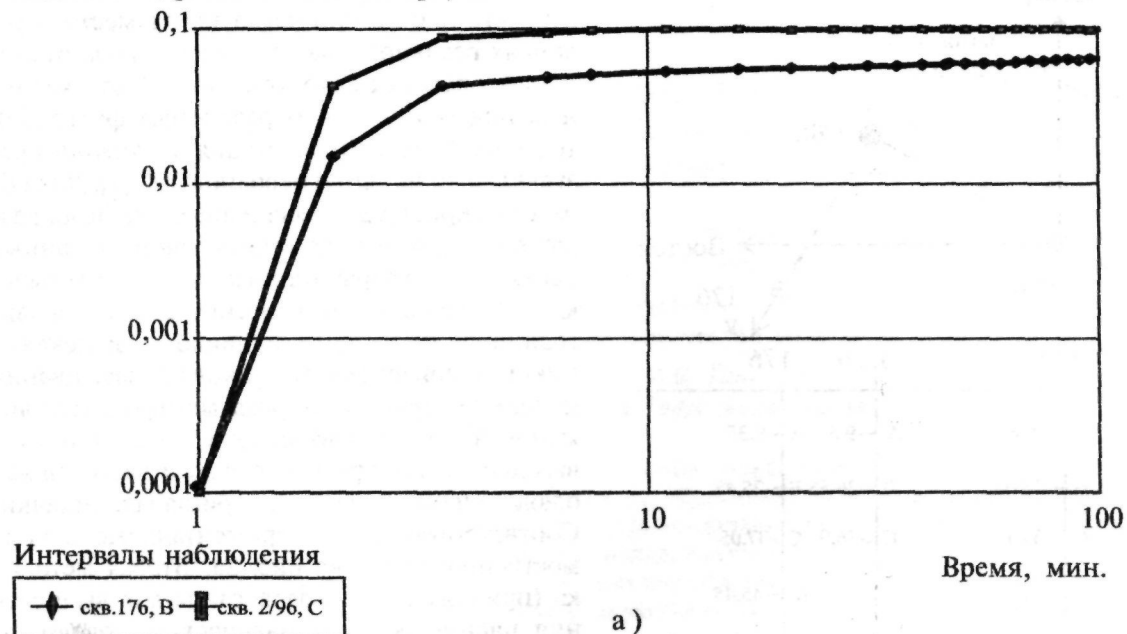
K – тензор коэффициента фильтрации;

S_s – водоотдача породы.

Тензор коэффициента фильтрации характеризуется матрицей K_f . Квадратичная форма $K_f \cdot x_i x_j$ является симметричной и положительно определенной.

Предполагаются однородные начальные условия $h(\vec{r}, t) = h_0$ при $t=0$, где $h_0 = const$.

Падение гидравлического напора, м



Падение гидравлического напора, м

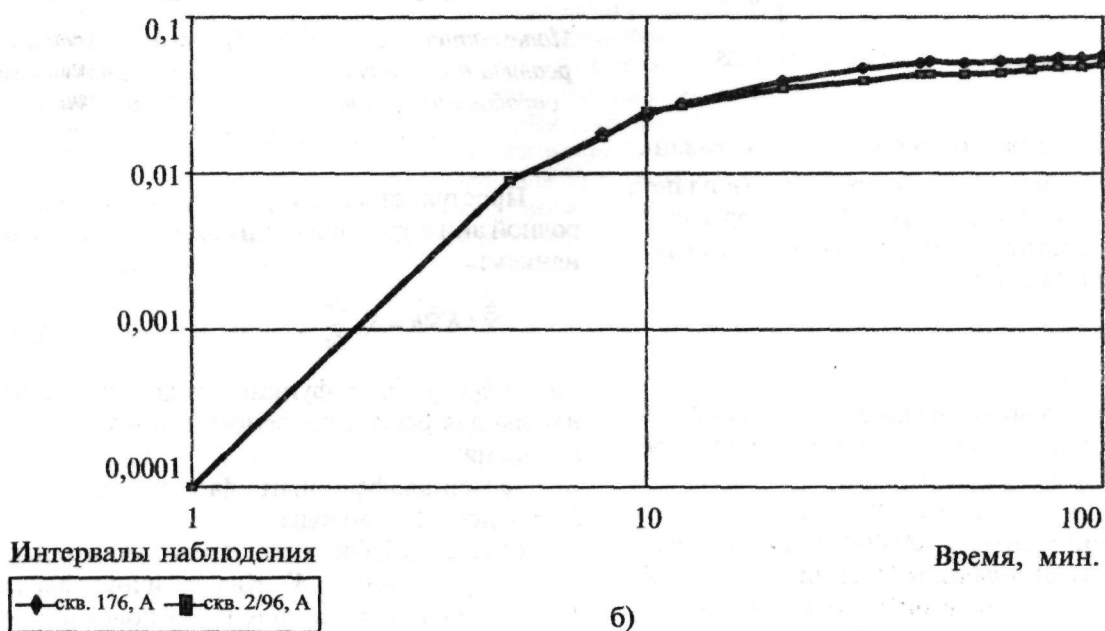


Рис. 2. Кривые депрессии (графики построены в двойном логарифмическом масштабе):

- а) – откачка из интервала В скважины 1/96;
- б) – откачка из интервала А скважины 1/96.

Задание граничного условия $h(\vec{r}, t) = h_0$, $|\vec{r}| \rightarrow \infty$ предполагает питание потока на границе.

Решение уравнения (1) при условии «откачки из точки» и «наблюдения в точке» получено в [1] в виде:

$$\Delta h_{ij} = \frac{Q}{4\pi R} \sqrt{\frac{K_d(e_{ij})}{D}} \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{R^2 S_s}{4K_d(e_{ij})t}} \right\}, \quad (2)$$

где Q – дебит откачки из интервала i ;
 Δh_{ij} – понижение напора в интервале наблюдения j при откачке из интервала i ;
 e_{ij} – единичный вектор в направлении от интервала откачки i к интервалу наблюдения j ;
 R – длина радиус-вектора интервала наблюдения относительно интервала откачки (расстояние от интервала откачки до интервала наблюдения);
 $K_d(e_{ij})$ – коэффициент фильтрации в направлении e_{ij} ;
 $D = \det K$ – определитель матрицы K ;

$\operatorname{erfc}\{u\} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf}\{u\}$ – функция дополнительной ошибки.

Предварительно была проведена оценка применимости решения (2) для обработки данных рассматриваемых экспериментальных работ. В работе [1] предлагалось использовать аналитическое решение (2) при условии, что

$$\alpha_1 = \frac{2R_{ij}}{L} \cdot \sqrt{\frac{K_d(e_1)}{K_d(e_{ij})}} \geq 5,0$$

$$\beta_1 = \frac{2R_{ij}}{B} \cdot \sqrt{\frac{K_d(e_b)}{K_d(e_{ij})}} \geq 5,0$$

где e_1, e_b – единичные векторы, параллельные интервалам откачки и наблюдения;
 L, B – длины интервалов откачки и наблюдения.

В эксперименте со скважинами 176, 2/96, 1/96 параметр α_1 изменялся в пределах от 3,55 для интервала F до 12,8 для интервала E (не учитывая интервал D). Значения α_1 для интервалов A, B, C и E превышали 5,0. Аналогичная картина наблюдалась и для параметра β_1 . Таким образом, для всех интервалов скважин 176, 2/96, 1/96, за исключением интервала F, применимо приближение: «откачка из точки – наблюдение в точке». Последующий анализ показал, что данное приближение работает также и для интервала F.

Исследование анизотропных свойств фильтрационного поля массива горных пород по модели [1] предполагало проведение перекрестного поинтервального наблюдения падения напора в наблюдательных скважинах при поинтервальном возмущении водоносного горизонта, так что в качестве скважины откачки должна была использоваться каждая из скважин по очереди. В рамках экспериментальных работ 1996 года была проделана только часть необходимых работ: в качестве скважины откачки использовалась скв. 1/96 и в качестве скважин наблюдения – скв. 2/96 и скв. 176, образующие со скв. 1/96 взаимноперпендикулярные плоскости. Описанная геометрия эксперимента (рис. 1) позволяет по модели [1] определить параметры фильтрационного поля в указанных плоскостях и при дополнительной схематизации гидрогеологических условий построить трехмерный эллипсоид для коэффициента фильтрации. Однако точное определение эллипсоида коэффициента фильтрации исследуемого водоносного горизонта возможно только на последующих этапах опытных работ, когда в качестве скважин откачки будут использованы скв. 176 и 2/96 при проведении перекрестных наблюдений.

Эллипсы коэффициента фильтрации в плоскостях, задаваемых скважинами 176, 1/96 (OYZ) и 2/96, 1/96 (OXZ) при возмущении различных интервалов водоносного горизонта

Для обработки кривых депрессии с резким скачком напора в начале откачки (по методу А) установившиеся значения напора со-

Таблица 1

Геометрические характеристики интервалов наблюдения относительно соответствующего интервала откачки и рассчитанные по двум методикам значения параметров математической модели

Интервал откачки, i	Геометр. характеристика, м	Дебит Q, 10 ⁻³ м ³ /с	Исслед. направл., j	Координаты, R _{ij}			K _d /S _s , м ² /с	D/S _s , 10 ⁻¹⁰ м ⁴ /с ³
				x, м	y, м	z, м		
метод А								
С, 1/96	32,3–42,5	0,125	Е (2/96)	10,02	0	-18,25	0,669	3,82
			Г (2/96)	10,02	0	-54,35	0,21	0,27
			Ф (2/96)	10,02	0	-32,55	0,057	0,25
			А (176)	0	10,1	27,55	0,132	0,313
			В (176)	0	10,1	11,45	0,331	0,798
			Ф (176)	0	10,1	-32,55	0,226	0,752
метод Б								
F, 1/96	55,4–75,9	1,25	А (2/96)	10,02	0	56,94	7,96	9,28
			С (2/96)	10,02	0	28,5	1,65	1,81
			Е (2/96)	10,02	0	10,5	0,26	0,36
			Ф (2/96)	10,02	0	-3,8	0,1	0,39
			А (176)	0	10,1	54,3	2,07	1,19
			С (176)	0	10,1	28,6	0,81	0,59
			Е (176)	0	10,1	12,85	6,89	3,55
			Ф (176)	0	10,1	-3,8	1,14	5,38
А, 1/96	0–19	0,147	А (2/96)	10,02	0	-0,1	0,06	9,29
			С (2/96)	10,02	0	-27,65	0,8	0,47
			Е (2/96)	10,02	0	-45,65	0,44	0,71
			Ф (2/96)	10,02	0	-59,95	0,74	0,32
			В (176)	0	10,1	-15,95	0,25	0,25
			Д (176)	0	10,1	-35,95	0,33	0,097
			Е (176)	0	10,1	-43,3	0,31	0,1

поставлялись с горизонтальной асимптотой и определялся параметр $D/K_d(e_{\psi})$, равный отношению объема эллипсоида фильтрации к значению коэффициента фильтрации в заданном направлении. Параметр пьезопроводности

$K_d(e_{\psi})/S_s$ вычислялся регрессионными методами. В рамках второго метода проводилось сравнение скорости изменения напора в интервале наблюдения с производной аналитического решения (1) по времени, и методами

Таблица 2

Значения главных коэффициентов фильтрации в плоскостях, задаваемых скважинами 1/96, 176 и 1/96, 2/96 и направления главных осей по отношению к вертикальному направлению, рассчитанные с использованием методов А и Б

Интервал возмущения (откачки)	Плоскость разреза, задаваемая скв. 176 и 1/96				Плоскость разреза, задаваемая скв. 2/96 и 1/96			
	K_{min} , м/с	Угол от вертика- ли, град.	K_{max} , м/с	Угол от вертика- ли, град.	K_{min} , м/с	Угол от вертика- ли, град.	K_{max} , м/с	Угол от вертика- ли, град.
расчет по методу А								
А, 1/96 (0–19 м)	$9,6 \cdot 10^{-6}$	-64	$1,04 \cdot 10^{-5}$	26	$4,7 \cdot 10^{-6}$	-25	$14,5 \cdot 10^{-5}$	65
С, 1/96 (32,3–41,5 м)	$1,5 \cdot 10^{-6}$	62	$4,27 \cdot 10^{-5}$	-28	$2,3 \cdot 10^{-5}$	-79	$14,9 \cdot 10^{-5}$	11
Е, 1/96 (49–54 м)	$3,8 \cdot 10^{-4}$	-85	$4,7 \cdot 10^{-4}$	5	$1,3 \cdot 10^{-4}$	-3	$7,6 \cdot 10^{-4}$	87
расчет по методу Б								
А, 1/96 (0–19 м)	$1,32 \cdot 10^{-6}$	-70	$1,12 \cdot 10^{-5}$	20	$4,36 \cdot 10^{-6}$	77	$4,2 \cdot 10^{-5}$	-13
Ф, 1/96 (55,4–75,9 м)	$1,81 \cdot 10^{-5}$	54	$3,49 \cdot 10^{-5}$	36	$3,2 \cdot 10^{-6}$	81	$9,55 \cdot 10^{-5}$	-9

регрессионного анализа определялись параметры коэффициента фильтрации.

Значения параметров $K_d(e_y)/S_s$ и D/S_s для интервалов откачки А, С, Ф, рассчитанные по двум методикам, представлены в табл. 1. В табл. 1 также приведены геометрические характеристики интервалов наблюдения.

В табл. 2 приведены результаты расчета главных значений эллипсов коэффициента фильтрации K_{max} и K_{min} в плоскостях, задаваемых скв. 1/96, 176 и 1/96, 2/96, и указаны направления главных осей по отношению к вертикали. Эллипсы коэффициента фильтрации характеризуют фильтрационное поле, соответствующее возмущению различных уровней водоносного горизонта.

На рис. 3 и 4 показаны эллипсы коэффициента фильтрации, рассчитанные по математической модели [1] с обработкой данных

откачки по методу, описанному в приложении Б.

Анализ данных (табл. 1 и 2) указывает на существенную неоднородность исследуемого водоносного горизонта. Приведем примеры, подтверждающие качественные изменения фильтрационного поля водоносного горизонта при изменении интервала откачки и отражающие неоднородность исследуемой среды (расчеты выполнены по методу А).

1. В плоскости, задаваемой скважинами 176 и 1/96, откачке из интервала В (скв. 1/96) при наблюдениях в интервалах А, В, С соответствует квадратичная форма тензора коэффициента фильтрации

$$K'_B = 4,9 \cdot 10^{-4} y^2 + 8 \cdot 10^{-5} z^2, \quad (3)$$

где угол между осями ВУ и ВУ' составляет 3,2°.

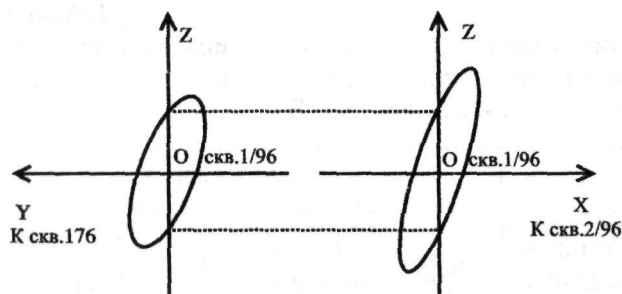


Рис. 3. Эллипсы, характеризующие фильтрационное поле для интервала А в плоскостях OYZ и OXZ (расчет по методу Б)^{*)}

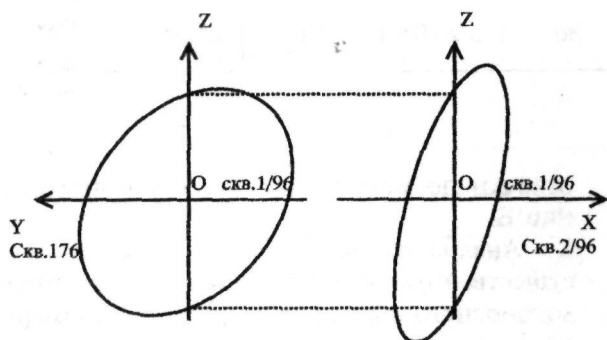


Рис. 4. Эллипсы, характеризующие фильтрационное поле для интервала F в плоскостях OYZ и OXZ (расчет по методу Б)^{*)}

^{*)} — по осям эллипсов отложены величины, пропорциональные квадратным корням из главных значений коэффициентов фильтрации [1]

Это соответствует преобладанию горизонтальной фильтрации в сравнении с вертикальной.

2. При включении в расчет интервала D значения рассчитываемых параметров резко изменяются. Так, откачке из В (скв. 1/96) и наблюдению в А, С, F скважины 176 соответствует квадратичная форма тензора коэффициента фильтрации

$$K_{\text{В}}^{\prime\prime} = 2 \cdot 10^{-3} y^{\prime\prime 2} + 2,2 \cdot 10^{-5} z^{\prime\prime 2}, \quad (4)$$

где угол между осями ВУ и ВУ^{′′} составляет 81,7°. Это соответствует случаю, когда фильтрация идет преимущественно вертикально. Такой же эффект наблюдается и в других аналогичных случаях при включении интервала D. Данные результаты обработки иллюстрируют резкое, скачкообразное изменение фильтрационного поля на верхней границе слоя, задаваемого интервалом D.

3. Рассмотрим нижнюю часть водоносного горизонта. Откачке из F (1/96) и наблюдению в D, E, F (2/96) соответствует квадратичная форма

$$K_{\text{F}}^{\prime} = 2,9 \cdot 10^{-4} x^{\prime 2} + 3,5 \cdot 10^{-5} z^{\prime 2}, \quad (5)$$

где угол между осями FX и FX[′] составляет -21°, т.е. преобладает горизонтальная фильтрация. Включая в фильтрационное поле верхние слои (верхнюю границу наблюдения — интервал D), получаем результат, аналогичный случаю 2. Откачке из F и наблюдению в интервалах в А, Е, G (2/96) соответствует квадратичная форма

$$K_{\text{F}}^{\prime\prime} = 5,5 \cdot 10^{-3} x^{\prime\prime 2} + 3,0 \cdot 10^{-5} z^{\prime\prime 2} \quad (6)$$

и угол между осями FX и FX^{′′} составляет -89,8°, что соответствует вертикальной фильтрации.

Таким образом, водоносный горизонт следует разделить на три горизонтальных слоя:

- первый объединяет интервалы А, В, С;
- второй соответствует верхней границе интервала D;
- третий объединяет D, Е, F, G.

Таблица 3

Сравнение результатов расчета коэффициента фильтрации для горизонтальных направлений различными методами

Интервал откачки	Горизонтальная составляющая коэффициента фильтрации К, м/с						
	По математической модели [1]				По данным опытно-фильтрационных работ [2]		
	Метод А		Метод Б		по удельному дебиту	при поинтервальном наблюдении с откачкой из полной скважины 1/96	
	в напр. к скв.176	в напр. к скв. 2/96	в напр. к скв.176	в напр. к скв.2/96		в напр. к скв.176	в напр. к скв.2/96
А	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$6,32 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$2,27 \cdot 10^{-6}$	$3,67 \cdot 10^{-6}$
Б	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$4,21 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$4,49 \cdot 10^{-5}$	$4,21 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-5}$

На границе между слоями фильтрационное поле меняется скачкообразно.

Сравнение коэффициентов фильтрации, рассчитанных для горизонтальных направлений (от скв. 1/96 к скв. 176 и 2/96), с результатами опытно-фильтрационных работ [2] приведено в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что в результате расчетов по методу А получаются значения коэффициентов фильтрации, существенно превышающие значения, полученные другими методами. Метод А дает скорее качественные, чем количественные оценки, что может быть объяснено деформацией кривых депрессии, полученных в экспериментальных работах [2] — большая часть их не имела явно выраженного участка с установившимся напором. Метод Б, в котором для расчетов используется только начальный участок кривых депрессии, дает результаты, сопоставимые с оценками коэффициентов фильтрации, рассчитанными по результатам опытно-фильтрационных работ, в пределах методической погрешности определения параметров.

Расчеты, выполненные в данной работе при рассмотрении осредненной водопроницаемости, показывают, что преобладающим на-

правлением водопроницаемости при возмущении интервалов водоносного горизонта в пределах А—С (0—49 м) и наблюдении в интервалах всего водоносного горизонта является вертикальное направление (рис. 3). Следует отметить, что если рассматривать только верхние интервалы наблюдения и откачки А—С, то преобладающим направлением будет горизонтальное (уравнение (3)). При переходе на уровни, расположенные ниже 49 м наблюдается значительное возрастание величины как горизонтальной, так и вертикальной составляющих коэффициента фильтрации (рис. 4, уравнения (4—6)). Анализ полученных значений коэффициентов фильтрации показал, что степень анизотропности водоносного горизонта в нижних слоях существенно ниже, чем в верхних.

Эллипсоиды коэффициента фильтрации, соответствующие различным интервалам возмущения водоносного горизонта

Как уже отмечалось выше, точное построение эллипсоидов коэффициента фильтрации на данном этапе экспериментальных работ невозможно. Однако, если ввести допол-

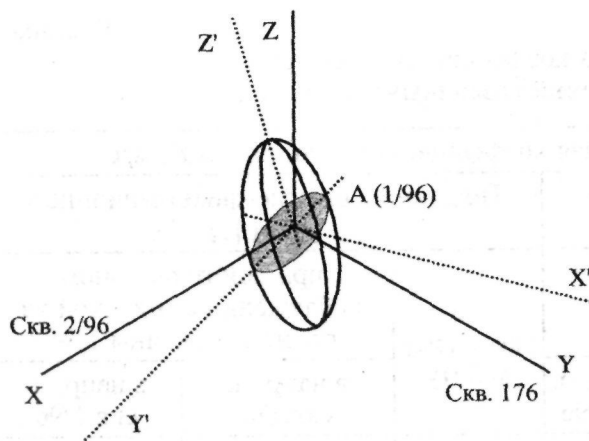


Рис. 5. Эллипсоид, характеризующий фильтрационное поле для интервала А (расчет по методу Б)^{*)}

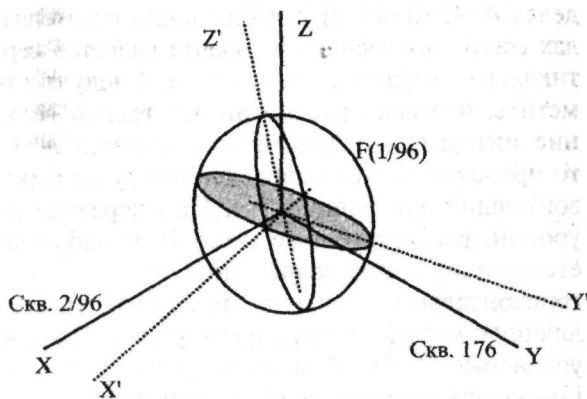


Рис. 6. Эллипсоид, характеризующий фильтрационное поле для интервала F (расчет по методу Б)^{*)}

^{*)} — по осям эллипсов отложены величины, пропорциональные квадратным корням из главных значений коэффициентов фильтрации [1]

нительное условие о малости члена K_{xy} тензора коэффициента фильтрации для возмущения любого интервала водоносного горизонта, возможно получить решение не исходной задачи, которая является неопределенной, а близкой к ней вспомогательной задачи. Такое предположение является вполне допустимым, поскольку преобладающим направлением фильтрации для водоносного горизонта в целом является вертикальное направление.

Учитывая сделанное допущение, был рассчитан тензор коэффициента фильтрации. В табл. 4 приведены главные значения коэффициентов фильтрации и указаны направления главных осей для интервалов откачки А и F скважины 1/96. На рис. 5 и 6 показаны эллипсоиды коэффициента фильтрации, рассчитанные по математической модели [1] с обработкой данных откачки по методу, описанному в приложении Б. Расчеты тензоров коэффициента фильтрации выполнялись по данным всех интервалов наблюдения с использованием метода наименьших квадратов.

Представляет интерес сравнить результаты расчета тензора коэффициента фильтрации, выполненные по математической модели [1, 3] и коэффициенты фильтрации, рассчитанные при обработке телефотопанорамы скважины 1/96 [2] (табл. 5).

Сравнение результатов показывает, что значения главных коэффициентов фильтрации, рассчитанные по математической модели [1, 3] не противоречат значениям, полученным при обработке телефотопанорамы скв. 1/96. Несоответствие направлений ориентации макротрещин и главных осей эллипсоида коэффициента фильтрации, по-видимому, связано с невозможностью полностью учесть при расчете по ТФМ высокопроницаемые зоны дробления.

Обсуждение результатов

Выполненные исследовательские работы по расчету тензора коэффициента фильтрации позволяют сделать следующие выводы:

Таблица 4

Главные значения коэффициента фильтрации и направления главных осей для интервалов А и F

Интервал откачки А				Интервал откачки F			
Главные значения коэффициента фильтрации, м/с	углы, град.			Главные значения коэффициента фильтрации, м/с	углы, град.		
	к оси X (скв.2/96)	к оси Y (скв.176)	к оси Z (зенит)		к оси X (скв.2/96)	к оси Y (скв.176)	к оси Z (зенит)
$1,41 \cdot 10^{-6}$	118	33	74	$1 \cdot 10^{-6}$	162	86	74
$3,88 \cdot 10^{-6}$	144	122	76	$2,27 \cdot 10^{-5}$	81	11	81
$28,49 \cdot 10^{-6}$	70	96	22	$6,8 \cdot 10^{-5}$	75	100	18

Таблица 5

Сравнение результатов расчета тензора коэффициента фильтрации по математической модели [1] и данным телефотометрии (ТФМ) [2]

Главные коэффициенты фильтрации	Характеристики главного коэффициента фильтрации	по данным ТФМ скв.1/96 (по макротрещинам)	по мат. модели [1] для интервала А	по мат. модели [1] для интервала F	ТФМ (поинтервально)
Максимальный коэффициент	значение, м/с	$1,37 \cdot 10^{-5}$	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$ (для F)
	угол к оси OZ, град	113	22	18	
Минимальный коэффициент	значение, м/с	$1,11 \cdot 10^{-6}$	$1,41 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$ (для A)
	угол к оси OZ, град	30	74	74	

1. Полученные оценки тензора коэффициента фильтрации методом расчета квадратичных форм по результатам мультипакерных исследований для участка куста скважин (1/96, 2/96, 176) удовлетворительно согласуются с расчетными значениями, полученными по данным опытно-фильтрационных работ (для горизонтальной плоскости) и ТФП (для трехмерной среды).

2. Оценка степени однородности водоносного горизонта показала существенное изменение фильтрационного поля по глубине. Рассматриваемая толща достаточно обоснованно может быть представлена тремя горизонтальными слоями:

- первым – объединяющим интервалы А, В, С;
- вторым – представленным верхней грани-

цей интервала D;

- третьим – объединяющим интервалы D, E, F.

В отличие от преимущественной горизонтальной фильтрации, отмечаемой в нижнем и верхнем горизонтах, на верхней границе интервала D преобладает вертикальная фильтрация. Трехслойное строение исследуемой толщи накладывает существенные ограничения на применение методики обработки подобных результатов, предложенной в работе [1].

3. Параметры фильтрации, характеризующие водоносный горизонт в целом, полученные для условно однородной толщи, указывают на преобладание вертикального направления водопроводимости над горизонтальным, что создает благоприятные условия для разгрузки вод нижнего горизонта. Учитывая, что в настоящее время загрязнение фиксируется по скважинам опытного куста в интервалах E и F, можно предполагать, что низкая горизонтальная проводимость на верхней границе интервала D в пределах данного участка не будет сдерживающим фактором разгрузки в р. Мишеляк загрязненных подземных вод от оз. Карачай.

4. Расчетные значения коэффициентов фильтрации указывают, что для верхних интервалов характерно преобладание горизонтальной проводимости в направлении скв. 2/96. Для нижних интервалов наблюдается фильтрационное поле, близкое к изотропному.

5. Следует отметить, что сложные гидрогеологические условия не позволили в полной мере применить математическую модель, предложенную в [1]. С учетом сделанных допущений это могло привести к дополнительным методическим погрешностям в расчетных значениях коэффициентов фильтрации.

6. Анализ экспериментальных данных и проведенные расчеты позволяют дать предварительные рекомендации по совершенствованию методики проведения подобных опытов (требования к расположению наблюдательных скважин, количеству интервалов наблюдений, количеству перекрестных измерений и т.д.),

что особенно важно в случае недостаточной геолого-гидрогеологической изученности участка, выбранного для детальных исследований.

В заключение следует еще раз отметить, что выполненные мультипакерные исследования и проведенная обработка результатов позволили обосновать, что изучаемый водоносный горизонт должен быть схематизирован как трехслойная толща. В связи с этим, для получения в рамках новой схематизации расчетных гидрогеологических параметров, используемых в геомиграционной модели участка разгрузки в р. Мишеляк, необходимо провести дополнительные исследования. По мнению авторов, особое внимание необходимо обратить на проведение перекрестных наблюдений, при которых в качестве откачной скважины поочередно используются скв. 176, 1/96 и 2/96. Это позволит устранить неопределенность постановки задачи определения тензора коэффициента фильтрации. Новая схема опыта позволит перейти к полевому определению коэффициента фильтрации в многослойном водоносном горизонте с учетом скачкообразного изменения этого поля на границах между слоями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hsieh P.A., Neuman S.P. Field Determination of the Three-Dimensional Hydraulic Conductivity Tensor of Anisotropic Media] Water Resources Research, Part I, II, V.21, No.11, 1985.
2. Дрожко Е.Г., Иванов И.А., Самсонова Л.М., Глаголев А.В., Глинский М.Л., Тер-Саакян К.С., Скоков А.В., Looney В.В., Nicholss R.L. Определение параметров гидравлической проводимости в анизотропных неоднородных средах. Часть I. Постановка полевых экспериментов и предварительные результаты // Вопросы радиационной безопасности. – 1998. – №1. – С.9–22.
3. Боровский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек – М.: Недра, 1979.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Методика расчета параметров математической модели [1] по участку с установившимся напором

Расчет $K_d(e_{ij})/D$ и $S_s/K_d(e_{ij})$ выполнялся следующим образом:

1. Фиксировались значения установившегося гидравлического напора $\Delta h_{стат}$. Это значение $\Delta h_{стат}$ сопоставлялось с горизонтальной асимптотой моделируемой функции для каждого направления e_{ij} , где j — интервал наблюдения, i — интервал откачки. Критерием установившегося режима являлось попадание значений измеренных напоров в интервал ± 5 мм вод. ст (соответствующий погрешности измерения) относительно горизонтальной асимптоты. Результаты, нарушающие монотонность роста значения сигнала, рассматривались как выбросы и отбрасывались. Параметр $D/K_d(e_{ij})$ рассчитывался по формуле $D/K_d(e_{ij}) = (Q/4\pi\Delta h_{стат})^2$.

2. Фиксируя направление e_{ij} , находим для каждого момента t неустановившегося режима фильтрации значения $R^2/4u^2$, где u — аргумент функции $\Delta h(t)/\Delta h_{стат} = \text{erfc}\{u\}$, и методом ортогональных проекций проектируем вектор $\{R^2/4u^2\}$ на пространство $\{t\}$, откуда определяем параметр $K_d(e_{ij})/S_s$.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Методика расчета параметров математической модели [1] по начальному периоду квазистационарной фильтрации

Дифференцируя аналитическое решение (1) по времени t , получаем уравнение для скорости изменения напора в интервале наблюдения для момента времени t :

$$\frac{d}{dt} \Delta h(t) = \frac{Q}{8\pi^{3/2}} \sqrt{\frac{S_s}{D}} \cdot \frac{1}{t^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2 S_s}{4K_d(e_{ij}) \cdot t}\right)$$

Сопоставляя рассчитанные производные для разных моментов времени при неизменном направлении фильтрации, получаем:

$$\frac{\frac{d}{dt}(\Delta h(t_k))}{\frac{d}{dt}(\Delta h(t_n))} = \left(\frac{t_n}{t_k}\right)^{3/2} \cdot \exp\left[\frac{R^2 S_s}{4K_d(e_{ij})} \cdot \left(\frac{1}{t_n} - \frac{1}{t_k}\right)\right]$$

Для различных комбинаций $\{t_n, t_k\}$ составляется система уравнений, которая решается относительно параметра пьезопроводности $K_d(e_{ij})/S_s$ регрессионными методами. Параметр $D/K_d(e_{ij})$ определяем с помощью основного уравнения (2) математической модели [1, 3].