

П. Н. Костюкович

К РАСЧЕТУ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ РАБОТЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

В основе гидрогеологических расчетов вертикального дренажа при неустановившейся фильтрации лежат известные решения линейного уравнения теплопроводности и диффузии [10, 12]:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial S}{\partial r} = \frac{1}{a_r^0} \cdot \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (1)$$

в котором коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности) a^0 имеет одну и ту же величину в каждой точке пласта и, следовательно, не зависит от величины пластового давления и его депрессии S . На этом основании определение коэффициента пьезопроводности производится двумя способами: по графикам прослеживания уровня в скважинах (первый способ) и в лабораторных условиях путем сжатия жидкостей и образцов горных пород в пределах сохранения закона Гука (второй способ).

В результате опытов установлено, что коэффициент пьезопроводности находится в определенной зависимости от величины пластового давления [1, 2, 5, 7, 13]. Но так как при отборе жидкости из пласта происходит изменение пластового давления во времени и в пространстве, то в общем случае в однородном по проницаемости пласте коэффициент пьезопроводности является функцией пространственных координат и времени [4]. Исследуем этот вопрос для частного случая, когда скважина с постоянным дебитом $Q = \text{const}$ пущена в эксплуатацию в неограниченном по простиранию и однородном по проницаемости пласте постоянной мощности ($h = \text{const}$).

Для данной задачи решение уравнения (1) получено Тейсом в следующем виде:

$$S_{rt} = i_T \left[-\text{Ei} \left(-\frac{r^2}{4a_r^0 t} \right) \right] \approx i_T \ln \frac{2,25a_r^0 t}{r^2}, \quad (2)$$

где S_{rt} — понижение уровня (пластового давления) в точке r на момент времени t при данном $Q = \text{const}$; i_T — тангенс угла наклона графика прослеживания уровня $S_{rt} = f(\ln t)$ к оси $\ln t$, определяемый по формуле

$$i_T = \frac{Q}{4\pi(kh/\mu)_T} = \frac{S_{rt_2} - S_{rt_1}}{\ln(t_2/t_1)} = \text{const}, \quad (3)$$

где $(kh/\mu)_T = Q/4\pi i_T = \text{const}$ — коэффициент проводимости по Тейсу, определяемый с учетом фактора времени по формуле (3); μ , k — соответственно вязкость жидкости и коэффициент проницаемости пласта [10, 12].

В любой момент времени $t = \text{const}$ для двух значений r уравнение (1) переходит в уравнение Лапласа, а его решение (2) соответственно в решение уравнения Лапласа или известную формулу Дюпюи [5, 6, 7]:

$$Q = \frac{2\pi(kh/\mu)_D(S_{r_1t} - S_{r_2t})}{\ln(r_2/r_1)}, \quad (4)$$

где $(kh/\mu)_D$ — коэффициент проводимости по Дюпюи, определяемый по уравнению депрессионной поверхности без учета фактора времени. Из (4) имеем:

$$i_D = \frac{Q}{2\pi(kh/\mu)_D} = \frac{S_{r_1t} - S_{r_2t}}{\ln(r_2/r_1)} = \text{const}, \quad (5)$$

где i_D — тангенс угла наклона депрессионной поверхности $S_{rt} = f(\ln r)$ к оси $\ln r$ на момент времени t при данном $Q = \text{const}$ (поскольку в рассматриваемой задаче неустановившаяся депрессионная поверхность в пределах точности уравнения (4) передвигается параллельно самой себе [12], величина $i_D = \text{const} \neq f(t)$; при наличии открытой границы в пласте $i_D = f(t)$ [7]).

Из (2) и (5) соответственно получаем

$$\ln a_r^0 = \frac{S_{rt}}{i_T} + 2 \ln r - \ln 2,25t \quad (6)$$

и

$$S_{rt} = S_{rt}^0 - i_D \ln r, \quad (7)$$

где S_{rt}^0 — величина понижения уровня в точке $r=1$ в момент времени t при данном $Q = \text{const}$.

Подставляя (7) в (6), получаем

$$\ln a_r^0 = 2(1-n)\ln r + \left(\frac{S_{rt}}{i_T} - \ln 2,25t \right), \quad (8)$$

где

$$n = \frac{i_D}{2i_T} = \frac{(kh/\mu)_T}{(kh/\mu)_D} = \text{const}. \quad (9)$$

Опытные кустовые откачки показывают, что параметры пластов, определяемые в отдельности при установившейся и неустановившейся фильтрации, т. е. соответственно по формулам (4) и (2), нередко значительно отличаются [5, 7, 11]. Учитывая, к тому же, то обстоятельство, что коэффициент пьезопроводности зависит от пластового давления, а величина последнего является функцией r и t , имеем основание допустить, что в общем случае $(kh/\mu)_D \neq (kh/\mu)_T$. Тогда, согласно (8) и (9), коэффициент пьезопроводности является функцией r (или

функцией изменения пластового давления) и равенство (8) можем записать так:

$$\ln a_r = \ln a_r^0 + \lambda \ln r, \quad (10)$$

где a_r — коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности) в точке r при данном $Q = \text{const}$; a_r^0 — то же в точке $r=1$; $\ln a_r^0$ — отрезок оси $\ln a_r$, отсекаемый графиком $\ln a_r = f(\ln r)$ и равный

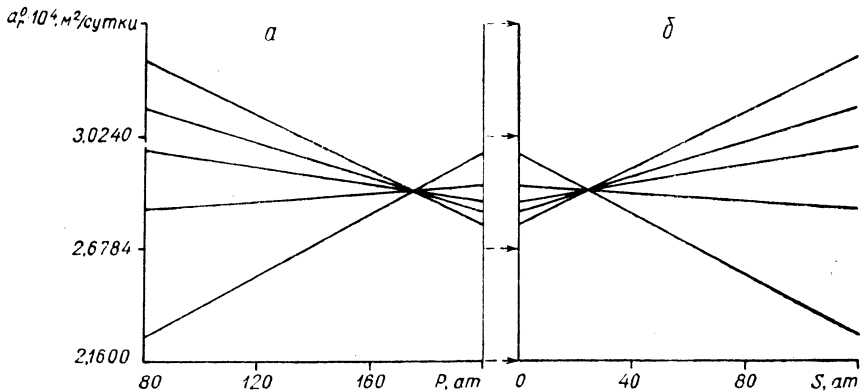


Рис. 1. Зависимость изменения коэффициента пьезопроводности от величины пластового давления в лабораторных условиях (по Гаджиеву) (а) и зависимость изменения коэффициента пьезопроводности от перепада давления (понижения уровня) для $p_{\text{ст}} = 200 \text{ ат}$ (б).

$$\ln a_r^0 = \frac{S_{rt}}{i_T} - \ln 2,25t; \quad (11)$$

λ — тангенс угла наклона графика $\ln a_r = f(\ln r)$ к оси $\ln r$, определяемый по формуле

$$\lambda = \frac{\ln(a_{r_2}/a_{r_1})}{\ln(r_2/r_1)} = 2(1 - n) = \text{const}. \quad (12)$$

Из (10) находим

$$a_r = a_r^0 r^\lambda, \quad (13)$$

что подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями неустановившейся фильтрации к скважинам в природных условиях [5].

Из (7) и (13) получаем

$$a_{S_{rt}} = a_{S_{rt}}^0 \exp[\lambda(S_{rt}^0 - S_{rt})/i_D], \quad (14)$$

где $a_{S_{rt}}$, $a_{S_{rt}}^0$ — соответственно величины коэффициента пьезопроводности при перепаде пластового давления S_{rt} и S_{rt}^0 , т. е. в точках r и $r=1$ в момент времени t при данном $Q = \text{const}$.

Функция (14) является общим интегралом дифференциального уравнения

$$\frac{\lambda}{i_D} = \frac{1}{a} \cdot \frac{da}{dS}, \quad (15)$$

где a — коэффициент пьезопроводности; S — изменение пластового давления (понижение уровня).

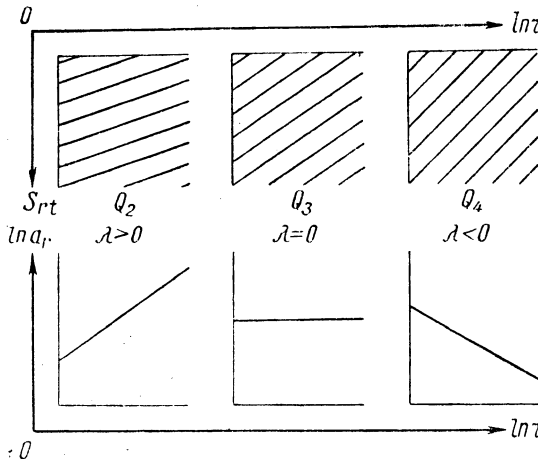


Рис. 2. Характер графиков $S_{rt} = f(\ln r)$ в различные моменты времени и соответствующие им функции $\ln a_r = f(\ln r)$ в случае пуска скважины с различными постоянными дебитами в неограниченном по простиранию пласте (по данным таблицы).

Уравнение (15) аналогично уравнению состояния капельно-сжимаемой жидкости

$$\beta_* = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dS}, \quad (16)$$

где β_* — коэффициент объемной упругости жидкости; ρ — плотность жидкости [10].

Используя установленную аналогию и равенство (13), получим закон изменения плотности жидкости при осесимметричной фильтрации

$$\rho_r = \rho_r^0 r^\nu, \quad (17)$$

где ρ_r — плотность жидкости в точке r при данном Q ; ρ_r^0 — то же в точке $r = 1$; $\nu = \beta_* i_D$ — тангенс угла наклона графика $\ln \rho_r = f(\ln r)$ к оси $\ln r$.

Доказано, что если исходить из зависимости плотности жидкости, проницаемости или пористости пласта от величины пластового давления, а такая зависимость всегда имеет место в природных условиях [10, 12], то коэффициент пьезопроводности также будет зависеть от величины давления. Дифференциальные уравнения в таких случаях яв-

ляются нелинейными или в первом приближении квазилинейными параболического типа, и коэффициент пьезопроводности в них зависит от искомой функции [1, 3]. Эти уравнения в инженерной практике не получают применения [3, 10, 12]. Поэтому заслуживают внимания такие методы вывода дифференциальных уравнений, когда зависимости параметров пласта и жидкости от величины (или перепада) пластового давления $a = \varphi(S)$ заменяются соответствующими зависимостями этих параметров от пространственных координат и времени $a = \varphi[r(r, t)]$, поскольку в каждой конкретной задаче характер функции $S = f(r, t)$ в об-

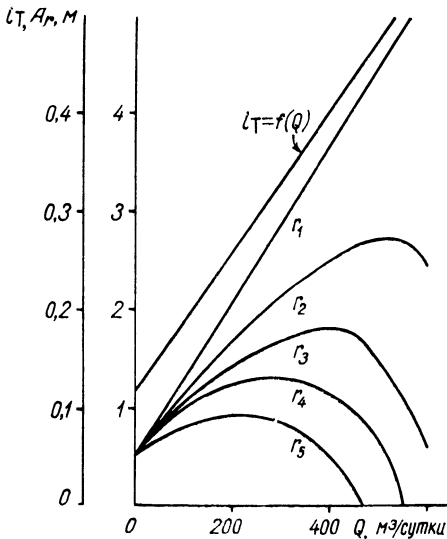


Рис. 3. Характер графиков $i_T = f(Q)$ и $A_r = f(Q)$ для различных наблюдательных скважин (A_r — понижение уровня в точке r на момент времени $t=1$).

щих чертах заранее известен из опыта или теории линейных дифференциальных уравнений. Следуя таким путем, вместо громоздких нелинейных уравнений мы получим относительно простые квазилинейные уравнения с коэффициентом пьезопроводности, являющимся функцией независимых переменных [7]. Подобные уравнения уже разрешимы аналитическими методами и, что не менее важно, приближают нас к более правильному пониманию механики неустановившегося движения подземных вод и их депрессионных поверхностей.

В качестве примера воспользуемся квазилинейным уравнением параболического типа

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial S}{\partial r} = \frac{(2-\lambda)^2}{4a_r^0 r^\lambda} \times \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{n^2}{a_r^0 r^{2(1-n)}} \cdot \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (18)$$

которое непосредственно вытекает из соотношений (13) или (17) и легко получается известными методами [3].

Будем решать поставленную задачу следующим образом. Предположим, что в рассматриваемом пласте существует мгновенный сток. Следуя Лапласу, для этого случая решение уравнения (18) получим в виде

$$S_{rt} = \frac{i_T}{t} \cdot \exp\left(-\frac{r^{2-\lambda}}{4a_r^0 t}\right) = \frac{i_T}{t} \cdot \exp\left(-\frac{r^{2n}}{4a_r^0 t}\right). \quad (19)$$

От мгновенного стока перейдем к скважине с дебитом $Q = \text{const}$. Тогда, используя функцию мгновенного стока (19) и метод У. Томсона (Кельвина) [10], получим решение уравнения (18) в таком виде

$$S_{rt} = \frac{Q}{4\pi(kh/\mu)_T} \left[-\text{Ei}\left(\frac{r^{2-\lambda}}{4a_r^0 r t}\right) \right] = \frac{Q}{4\pi(kh/\mu)_T} \times \left[-\text{Ei}\left(-\frac{r^{2n}}{4a_r^0 t}\right) \right]. \quad (20)$$

Решение рассматриваемой задачи Тейса для уравнения (18) можно получить также методом П. Я. Полубариновой-Кочиной [9]. Для этого введем новую функцию

$$\eta = \frac{r^{2-\lambda}}{4a_r^0 t}. \quad (21)$$

Поскольку

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} &= \frac{\partial S}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\eta}{t} \cdot \frac{\partial S}{\partial \eta}, \\ \frac{\partial S}{\partial r} &= \frac{\partial S}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial r} = \frac{(2-\lambda)r^{1-\lambda}}{4a_r^0 t} \cdot \frac{\partial S}{\partial \eta}, \\ \frac{\partial^2 S}{\partial r^2} &= \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial r} \right)^2 + \frac{\partial S}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} = \eta \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} \times \\ &\times \frac{(2-\lambda)^2}{4a_r^0 t r^\lambda} + \frac{\partial S}{\partial \eta} \cdot \frac{(2-\lambda)(1-\lambda)}{4a_r^0 t r^\lambda}, \end{aligned}$$

то, переходя в (18) к новой переменной, получим

$$\eta \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} + (1 + \eta) \frac{\partial S}{\partial \eta} = 0. \quad (22)$$

Общий интеграл уравнения (22) имеет вид

$$S_{rt} = c_1 \int \frac{e^{-\eta}}{\eta} d\eta + c_2. \quad (23)$$

Вводя обозначение интегральной показательной функции

$$\text{Ei} \left(-\frac{r^{2-\lambda}}{4a_r^0 t} \right) = - \int_{r^{2-\lambda}/4a_r^0 t}^{\infty} \frac{e^{-\eta}}{\eta} d\eta, \quad (24)$$

перепишем (23)

$$S_{rt} = c_1 \left[-\text{Ei} \left(-\frac{r^{2-\lambda}}{4a_r^0 t} \right) \right] + c_2. \quad (25)$$

Учитывая граничные и начальные условия задачи Тейса, определяем значения постоянных c_1 и c_2 и приходим к решению (20). Применяя его к двум точкам пласта, получим равенство (13). К тому же, при $\lambda=0$ уравнение (18) переходит в уравнение теплопроводности (1), а его решение (20) — в решение (2). При $\lambda=0$ имеет место аналогичный переход от фундаментального решения (19) уравнения (18) к фундаментальному решению

$$S_{rt} = \frac{i_T}{t} \exp \left(-\frac{r^2}{4a_r^0 t} \right) \quad (26)$$

уравнения теплопроводности (1). Это доказывает, что уравнение (18) характеризует процесс перераспределения пластового давления при неустановившейся осесимметричной фильтрации.

Из соотношения (13) следует, что в неограниченном по простиранию и однородном по проницаемости пласте постоянной мощности существуют три разновидности квазистационарной фильтрации, характеризующиеся собственными законами изменения коэффициента пьезопроводности: первый ($\lambda < 0, n > 1$), второй ($\lambda = 0, n = 1$) и третий ($\lambda > 0, n < 1$).

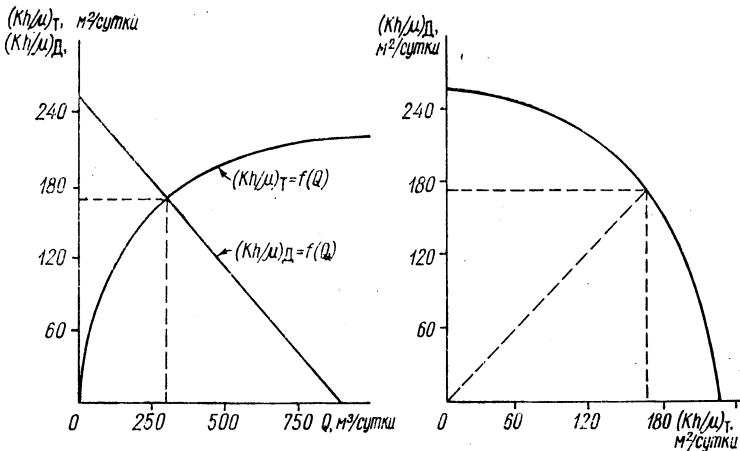


Рис. 4. Характер графиков $(kh/\mu)_T = f(Q)$, $(kh/\mu)_D = f(Q)$ и $(kh/\mu)_D = f[(kh/\mu)_T]$ при квазистационарной фильтрации.

Очевидно, только при второй разновидности квазистационарной фильтрации коэффициент пьезопроводности a_r имеет одну и ту же величину a_r^0 в каждой точке пласта и, следовательно, не зависит от величины и перепада пластового давления. Эта разновидность неустановившейся фильтрации лежит в основе современной теории упругого режима и детально исследована [10, 12].

Теперь предположим, что возмущающая скважина пущена в эксплуатацию с таким дебитом $Q = \text{const}$, что имеет место вторая разновидность квазистационарной фильтрации. В этом случае, согласно основной формуле теории упругого режима (2), в каждой точке пласта, несмотря на величины пластового давления p_{rt} и его депрессии S_{rt} , коэффициент пьезопроводности будет иметь одну и ту же величину a_r^0 . Пусть величина $S_{rt} = 120$ ат при пластовом давлении на контуре питания $p_{ct} = 200$ ат. Тогда, как показывают лабораторные исследования зависимости параметров жидкости и пласта от величины давления [1], в данной точке r за время t коэффициент пьезопроводности a_r^0 изменится (увеличится или уменьшится) от $2,3 \cdot 10^4$ до $2,9 \cdot 10^4$ м²/сутки, т. е. примерно на 20—25% (см. рис. 1). Таким образом, мы видим противоречие между основной формулой теории упругого режима (2), рассматривающей коэффициент пьезопроводности a_r^0 как физическую константу среды, независимую от величин p_{rt} , и экспериментальными исследованиями зависимости этой константы от величин p_{rt} [1, 2, 3] или S_{rt} [5].

Противоречие исключается, если коэффициент пьезопроводности, входящий в линейные и квазилинейные уравнения параболического типа, рассматривать как параметр неустановившегося фильтрационного потока, зависящий от соотношения скоростей $\left(\frac{\partial S}{\partial r} = \frac{\partial S}{\partial t} : \frac{\partial r}{\partial t}\right)$ перераспределения пластового давления (распространения уровня) в вертикальных $\left(\frac{\partial S}{\partial t}\right)$ и горизонтальных $\left(\frac{\partial r}{\partial t}\right)$ плоскостях (направлениях), т. е.

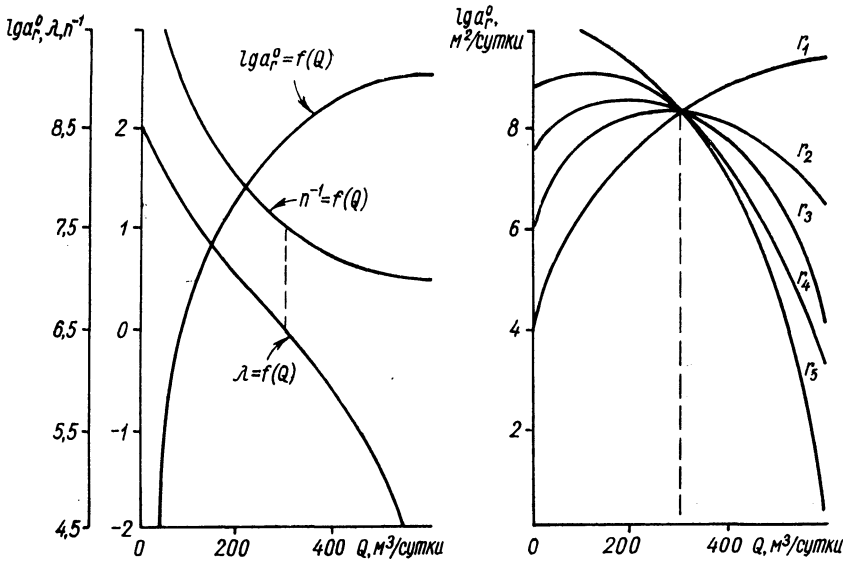


Рис. 5. Характер зависимости параметров λ , n^{-1} , $\lg a_r^0$ и $\lg a_r$ от интенсивности возмущения при квазистационарной фильтрации.

зависящий от уклона неустановившейся депрессионной поверхности $\left(\frac{\partial S}{\partial r}\right)$ и характера ее передвижения в вертикальной плоскости, проходящей через ось скважины (параллельно, поворотом относительно неподвижной точки $S_{rt} = 0$ на контуре питания, волнообразно и так далее в зависимости от характера и интенсивности возмущения и предельных условий на границах области фильтрации) [7].

Такое явление можно объяснить тем, что с увеличением интенсивности возмущения происходит возрастание вертикальной составляющей скорости $\frac{\partial S}{\partial t}$ распространения уровня. Это приводит к тому, что депрессионная поверхность принимает более крутое положение, так как горизонтальная составляющая скорости $\frac{\partial r}{\partial t}$ распространения уровня не зависит от интенсивности возмущения, в то время как скорость снижения (восстановления) уровня является функцией Q . В результате с увеличением дебита параметр n возрастает и наблюдается переход одной разновидности неустановившейся фильтрации в другую.

Действительно, из (18) имеем:

$$a_r = a_r^0 r^{2(1-n)} = cn^2, \quad (27)$$

где

$$c = \frac{\partial r}{\partial t} \cdot \frac{\text{grad } S}{\text{div}(\text{grad } S)} = \text{const.} \quad (28)$$

При каждом $Q = \text{const}$ параметры n и c являются константами, величина которых зависит от Q . Тогда из (27) следует, что с изменением дебита происходит изменение характера функций $a_r = f(r)$ и $a_r = f(Q)$.

Для экспериментальной проверки этого вывода нами был выбран практически неограниченный в плане и однородный по проницаемости водоносный пласт постоянной мощности, заключенный между водопроницаемыми отложениями. Опытный участок состоял из наблюдательных скважин r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 , пробуренных по лучу на расстоянии

Таблица 1

Данные опытов по изучению неустановившейся депрессионной поверхности при пуске скважины с различными постоянными дебитами

$Q,$ $\text{м}^3/\text{сутки}$	$t,$ сутки	$S_{rt}, \text{м}$						n, λ
		r_0	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	
$Q_1 = 120$	1	10,00	1,45	1,25	1,12	1,00	0,86	$n = 0,49,$ $\lambda = 1,02$
	2	11,53	1,51	1,31	1,18	1,06	0,92	
	4	13,06	1,57	1,37	1,24	1,12	0,98	
	6	13,97	1,61	1,41	1,28	1,16	1,02	
	10	15,10	1,65	1,45	1,32	1,20	1,06	
	i_T	5,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	
	$(kh/\mu)_T$	4,32	110	110	110	110	110	
$\lg a_r$	-0,59	6,90	7,89	8,65	9,25	9,95		
$Q_2 = 180$	1	15,00	1,90	1,58	1,35	1,16	0,94	$n = 0,665,$ $\lambda = 0,67$
	2	16,68	1,97	1,65	1,42	1,23	1,01	
	4	18,36	2,04	1,72	1,49	1,30	1,08	
	6	19,37	2,09	1,77	1,54	1,35	1,13	
	10	20,60	2,14	1,82	1,59	1,40	1,18	
	i_T	5,60	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	
	$(kh/\mu)_T$	5,90	137	137	137	137	137	
$\lg a_r$	0,13	7,55	8,25	8,67	9,08	9,57		
$Q_3 = 304$	1	25,70	2,85	2,20	1,75	1,37	0,90	$n = 1,$ $\lambda = 0$
	2	27,70	2,95	2,30	1,85	1,47	1,00	
	4	29,70	3,04	2,39	1,94	1,56	1,09	
	6	30,86	3,10	2,45	2,00	1,62	1,15	
	10	32,33	3,18	2,53	2,08	1,70	1,23	
	i_T	6,63	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	
	$(kh/\mu)_T$	8,37	172	172	172	172	172	
$\lg a_r$	1,32	8,42	8,42	8,42	8,42	8,42		
$Q_4 = 400$	1	34,00	3,51	2,52	1,82	1,22	0,51	$n = 1,28,$ $\lambda = -0,56$
	2	36,24	3,63	2,64	1,94	1,34	0,63	
	4	38,46	3,74	2,75	2,05	1,45	0,74	
	6	39,80	3,81	2,82	2,12	1,52	0,81	
	10	41,43	3,90	2,91	2,21	1,61	0,90	
	i_T	7,43	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	
	$(kh/\mu)_T$	9,80	187	187	187	187	187	
$\lg a_r$	2,02	8,65	8,10	7,72	7,38	6,96		

соответственно 1, 10, 50, 200, 1000 м от возмущающей скважины $r_0 = 0,08$ м. Замеры понижения уровня велись одновременно в возмущающей и наблюдательных скважинах в течение 10 суток.

Коэффициенты проводимости $(kh/\mu)_Г$ и $(kh/\mu)_Д$ и коэффициент пьезопроводности α_r определялись по фиксированным значениям Q и S_{rt} . Величины параметров i_T и i_D находились по графикам соответственно $S_{rt} = f(\ln t)$ и $S_{rt} = f(\ln r)$, т. е. по формулам (3) и (5). Для расчета величины коэффициента пьезопроводности во всех скважинах (точках пласта) использовалась формула (6).

Коэффициент фильтрации пласта при средних значениях дебита составлял около 13,3 м/сутки, $h = 10,3$ м, $\mu = 1$ сантипуазу.

Результаты опытов и рассчитанные на их основе параметры приведены в табл. 1 (коэффициенты пьезопроводности и проводимости даны в м²/сутки). Как видно из приведенных данных (рис. 2—5), при пуске скважины с различными дебитами наблюдается переход одной разновидности квазистационарной фильтрации в другую. При этом чем больше расход потока, тем круче депрессионная поверхность и выше порядок разновидности фильтрации.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что расчет неустановившейся депрессионной поверхности при работе вертикального дренажа можно вести по формуле (20), которая при $\lambda = 0$ переходит в основную формулу теории упругого режима и, следовательно, обладает одинаковой с нею точностью.

Анализ экспериментальных графиков прослеживания уровня $S'_{rt} = f(\ln t)$ показал [8], что погрешность формулы (20) не превышает 3—5% до конца первого этапа развития неустановившейся фильтрации t_0 , составляющего примерно $2/3$ времени стабилизации потока t_y (рис. 6). Начиная с момента t_0 отклонение расчетных величин S_{rt} , получаемых по формуле (20), от фактических S'_{rt} подчиняется строго определенной зависимости, которая подробно изучена на примере формулы (2). При этом было установлено, что стабилизация потока в возмущающих скважинах наступает, когда расчетная скорость снижения (восстановления) уровня, определяемая по формуле (20), составляет 0,25, т. е. при $\frac{\partial S_{rt}}{\partial t} = \frac{i_{Tc}}{t_y} = 0,25$, где i_{Tc} — величина параметра i_T в возмущающей скважине. В наблюдательных скважинах появление установившейся фильтрации наступает при $\frac{\partial S_{rt}}{\partial t} = \frac{i_T}{t_y} = 0,01$.

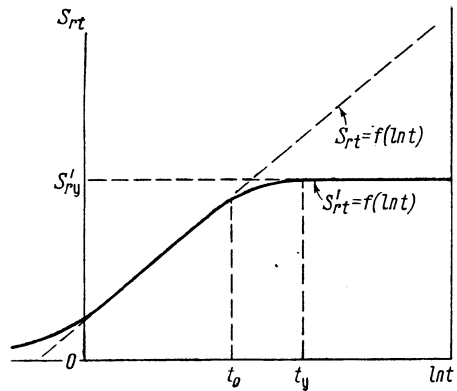


Рис. 6. Экспериментальные (S'_{rt}) и теоретические (S_{rt}) графики прослеживания уровня в неограниченном по простиранию водоносном горизонте.

Литература

1. *Гаджиев Ш. А.* Изменение коэффициента пьезопроводности в зависимости от пластового давления. «Изв. вузов. Нефть и газ», 1965, № 8.
2. *Добрынин В. М.* Изменение коэффициента упругемкости песчаных пластов в зависимости от горного и пластового давлений. «Нефтяное х-во», 1963, № 2.
3. *Калыняк Н. И., Леций Н. П.* Движение сжимаемой жидкости в упругой среде при переменном коэффициенте пьезопроводности. «Изв. вузов. Нефть и газ», 1967, № 5.
4. *Костюкович П. Н.* О коэффициенте пьезопроводности. «Изв. вузов. Геология и разведка», 1965, № 10.
5. *Костюкович П. Н.* Об исходных предпосылках при определении промежутка высачивания и параметров пластов. «Изв. вузов. Геология и разведка», 1966, № 3.
6. *Костюкович П. Н.* К определению коэффициента фильтрации опытными откачками. «Инж.-физ. журн.», 1967, т. 12, № 5.
7. *Костюкович П. Н.* О параметрах неустановившейся фильтрации. Сб. «Использование и охрана водных ресурсов Белоруссии». Минск, 1967.
8. *Костюкович П. Н.* Исследование параметров пластов в натуральных условиях. Сб. «Комплексное использование и охрана водных ресурсов». Минск, 1968.
9. *Полубаринова-Кочина П. Я.* Теория движения грунтовых вод. М., 1952.
10. *Пыхачев Г. Б.* Подземная гидравлика. М., 1961.
11. *Стрельцова Т. Д., Шестаков В. М.* Определение гидрогеологических параметров безнапорных пластов по данным опытных откачек из совершенных скважин. Сб. «Вопр. определения гидрогеологических параметров и расчета эксплуатационных запасов подземных вод», вып. 1. М., 1967.
12. *Шелкачев В. Н.* Разработка нефтесодержащих пластов при упругом режиме. М., 1959.
13. *Fatt J.* Effect of overburden on relative permeability. „Journal of Petroleum Technology“, October, vol. 5, № 10, 1953.