П. Н. Костюкович

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ К СКВАЖИНАМ

Анализ развития радиуса влияния скважин показывает, что неустановившаяся фильтрация в водоносных горизонтах носит весьма сложный характер и даже в условиях однородных по проницаемости пластов часто не согласуется с известными представлениями теории линейной фильтрации. Особенно неясными остаются характер распространения и восстановления неустановившейся депрессионной воронки, ее форма и размеры при различных дебитах скважины. Можно полагать, что такое явление имеет место из-за нестабильности режима водного питания пластов (или граничных условий в общем случае), а также из-за воздействия на неустановившееся движение воды силы тяжести и начального градиента напора (или начального градиента фильтрации) I_0. Влияние этих факторов на поведение неустановившейся (и особенно свободной) депрессионной поверхности только начинает изучаться.

Существование начального градиента напора I_0 и вытекающего из него обобщенного закона Дарси приводит к тому, что скорости перераспределения пластового давления и роста неустановившегося радиуса влияния носят затухающий характер. По этой причине радиус влияния скважин всегда имеет конечную величину (практически весьма небольшую) и является функцией дебита скважины [1, 2]. Аналогично параметры пласта, определяемые по формулам теории линейной фильтрации (например, по формулам Дюпюи и Тейса), при наличии I_0 также являются функциями интенсивности возмущения [2, 3]. В связи с этим и возникает вопрос о том, в каких средах движение воды подчиняется закону Дарси и теории линейной фильтрации, а в каких возникает I_0, и движение подземных вод характеризуется теорией нелинейной или квазилинейной фильтрации.

Для изучения этого вопроса были проведены лабораторные опыты на фильтрационной трубке длиной 1 *м* и сечением 100 *см*^{2} [3]. Пьезометрическая поверхность замерялась по многочисленным пьезометрам, расположенным вдоль трубки. За градиент напорного установившегося потока принимался уклон прямолинейного участка пьезометрической поверхности, находящегося в центральной части трубки (вблизи торцов трубки пьезометрическая поверхность резко изгибается, поэтому показания торцевых пьезометров в расчет не принимались). Пористой средой служили фракции песка диаметром 0,5—1,0 *мм* ($k_d = 80$ *м/сутки*) и 2—3 *мм* ($k_d = 393$ *м/сутки*).

Установлено, что движение воды в средне- и крупнозернистых песках происходит также при наличии I_0. Причем в одной и той же пористой среде величина I_0 может быть различной в зависимости от интенсивности и характера потока. Отсюда следует, что практически во всех водоносных горизонтах движение подземных вод будет происходить с возникновением начального градиента фильтрации [3].

Для проверки этого вывода в натурных условиях обобщим результаты определения коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности) a и водоотдачи (упругоемкости или запаса) пласта μ, полученные при проведении опытных откачек в однородных по проницаемости средах. Такой анализ позволит оценить достоверность различных гипотез о физической сущности параметров a и μ и создаст предпосылки для построения более совершенных моделей неустановившейся напорной и безнапорной фильтрации.

Для расчета a и μ воспользуемся формулой Ч. В. Тейса [4]

$$S_{rt}=\frac{Q}{4\pi T}\ln\frac{2{,}25\,at}{r^2}=i\ln\frac{2{,}25\,at}{r^2}=i^*\lg\frac{2{,}25\,at}{r^2}, \tag{1}$$

где $Q=\text{const}$ — дебит скважины; S_{rt} — понижение уровня в точке r на момент времени t при данном Q; $T=km=Q/4\pi i$ — проводимость пласта по Тейсу, определяемая с учетом времени t; $i=Q/4\pi T$ — тангенс угла наклона графика прослеживания уровня $S_{rt}=f(\ln t)$ к оси $\ln t$ в наблюдательной скважине r; $i^*=2{,}3\ i=0{,}183\ Q/T$ — то же для графика $S_{rt}=f(\lg t)$; a — коэффициент пьезопроводности пласта по Тейсу, определяемый по фиксированным значениям Q, S_{rt}, i из формулы (1)

$$\ln a=\frac{S_{rt}}{i}-\ln\frac{2{,}25\,t}{r^2}\,. \tag{2}$$

Для расчета коэффициента упругоемкости пласта μ имеется множество формул, вытекающих из соответствующих гипотез Буссинеска, В. Херста — М. Маскета, С. Е. Джейкоба — Ч. В. Тейса, В. Н. Щелкачева, Г. И. Баренблатта — А. П. Крылова, В. Н. Николаевского, В. М. Шестакова, Р. Де Уиста, Н. Н. Веригина и других исследователей [4—7]. Однако все они независимо от физического толкования параметра μ (а следовательно, и a) в конечном итоге приходят к линейному уравнению параболического типа [4, 5, 6]

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\,\frac{\partial S}{\partial r}=\frac{1}{a}\,\frac{\partial S}{\partial t}\,, \tag{3}$$

где

$$a=T/\mu=\text{const}\neq f(Q). \tag{4}$$

На этом основании значение a из (2) можем подставить в формулу (4). Тогда получим выражение для определения коэффициента упругоемкости пласта μ по фиксированным значениям Q, S_{rt}, i

$$\ln\mu=\ln\frac{T}{a}=\ln\frac{Q}{4\pi\,ia}=\ln\frac{2{,}25\,Tt}{r^2}-\frac{S_{rt}}{i}\,. \tag{5}$$

Формула (1) справедлива для квазистационарного периода неустановившейся фильтрации, когда графики $S_{rt}=f(\ln t)$ (в различных точках пласта r) и $S_{rt}=f(\ln r)$ (на различные моменты времени t) прямолинейны и подчиняются уравнениям:

$$S_{rt}=A_r+i\ln t=A_r+i^*\lg t\quad(r=\text{const}), \tag{6}$$

$$S_{rt}=A_t-i_D\ln r=A_t-i_D^*\lg r\quad(t=\text{const}), \tag{7}$$

где A_r — величина S_{rt} на момент времени $t=1$ в точке r; A_t — величина S_{rt} в точке $r=1$ на момент времени t; $i_D=Q/2\pi T_D$ — тангенс угла наклона графика $S_{rt}=f(\ln r)$ к оси $\ln r$ на момент времени t; $i_D^*=2{,}3\ i_D=0{,}366\ Q/T_D$; $T_D=Q/2\pi i_D=0{,}366\ Q/i_D^*$ — проводимость пласта по Дюпюи, определяемая без учета фактора времени из формулы Дюпюи (7).

Функции (6) и (7) представляют собой фундаментальные решения уравнения Лапласа в пространстве понижение — время

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2}+\frac{1}{t}\frac{\partial S}{\partial t}=0 \tag{8}$$

и в пространстве понижение — расстояние

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial S}{\partial r}=0. \tag{9}$$

Уравнения Лапласа (8) и (9) показывают, что в задаче Ч. В. Тейса квазистационарное поле в пространстве времени также является потенциальным и, следовательно, может быть смоделировано на интеграторах, применяемых для моделирования стационарных потенциальных полей.

Из уравнений (6) и (7) следует, что если опытные значения S_{rt} в координатах S_{rt}—$\ln t$ и S_{rt}—$\ln r$ образуют семейства параллельных прямых с угловыми коэффициентами соответственно i и i_D, то испытуемый пласт является однородным по проводимости и характеризуется параметрами $T=\text{const}$ и $T_D=\text{const}$.

Приведем результаты опытных откачек, удовлетворяющие условиям (6) и (7). Во всех опытах расчет a и μ произведен по формулам (2) и (5).

В опытах Л. К. Венцеля [7] приведены фактические понижения уровня S_{rt}'. Отсчет S_{rt}' производился от абсолютной отметки статического уровня ∇_{cr} в данной точке r. Поскольку в данных опытах $\nabla_{cr}=f(r)$, для анализа использованы приведенные (или расчетные) понижения уровня S_{rt}. Перевод S_{rt}' в S_{rt} произведен по формуле [8]

$$S_{rt}=S_{rt}'+\nabla_r=S_{rt}'+\nabla_{\text{п}}-\nabla_{cr}, \tag{10}$$

где $\nabla_{\text{п}}$ — абсолютная отметка приведенного статического уровня, от которого отсчитываются понижения S_{rt}; $\nabla_r=\nabla_{\text{п}}-\nabla_{cr}$ — поправка на приведение фактического понижения S_{rt}' к расчетному S_{rt} в точке r.

Результаты опытов Л. К. Венцеля и рассчитанные по ним значения a и μ приведены в табл. 1, 2. Построенные по опытным значениям a и μ графики $\ln a=f(\ln r)$ и $\ln\mu=f(\ln r)$ показывают (рис. 1), что в однородных по проницаемости неограниченных пластах имеют место весьма важные соотношения:

$$\ln a=\ln a_r=\ln a_r^0+\lambda\ln r,\quad a_r=a_r^0 r^{\lambda}, \tag{11}$$

$$\ln\mu=\ln\mu_r=\ln\mu_r^0-\lambda\ln r,\quad \mu_r=\mu_r^0 r^{-\lambda}, \tag{12}$$

где

$$\lambda=\frac{\ln(a_{r_2}/a_{r_1})}{\ln(r_2/r_1)}=-\frac{\ln(\mu_{r_2}/\mu_{r_1})}{\ln(r_2/r_1)} \tag{13}$$

есть тангенс угла наклона графиков $\ln a=f(\ln r)$ и $\ln\mu=f(\ln r)$ к оси $\ln r$ при данном $Q=\text{const}$; a_r и $\mu_r=T/a_r$ — величины параметров a и μ в

Таблица 1

Результаты опытной откачки вблизи Скоттсблафа при $Q=1270$ *галл/мин* $=168{,}91$ *фут³/мин* ($\lambda=-2{,}65$; $n=0{,}43$; $T_D=12{,}1$ *фут²/мин*; $T=28{,}1$ *фут²/мин*)

$\lg t$, *мин*	Понижение S_{rt}, *фут*, по скважинам							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
2,0	5,61	3,74	2,81	2,26	1,41	0,76	0,26	—0,24
2,1	5,72	3,85	2,92	2,37	1,52	0,87	0,37	—0,13
2,2	5,83	3,96	3,03	2,48	1,63	0,98	0,48	—0,02
2,3	5,94	4,07	3,14	2,59	1,74	1,09	0,59	0,09
2,4	6,05	4,18	3,25	2,70	1,85	1,20	0,70	0,20
2,5	6,16	4,29	3,36	2,81	1,96	1,31	0,81	0,31
2,6	6,27	4,40	3,47	2,92	2,07	1,42	0,92	0,42
2,7	6,38	4,51	3,58	3,03	2,18	1,53	1,03	0,53
∇_r, *фут*	—0,08	—0,16	—0,24	—0,32	—0,47	—0,63	—0,79	—0,94
r, *фут*	49,84	99,69	149,5	199,9	299,5	399,4	498,4	598,6
$\lg r$	1,70	2,00	2,175	2,30	2,476	2,60	2,70	2,777
i^*, *фут*	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
T, *фут²/мин*	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1
$\lg a$, *фут²/мин*	6,15	5,05	4,55	4,30	3,88	3,54	3,29	2,98
$\lg \mu = \lg (T/a)$	—4,70	—3,60	—3,10	—2,85	—2,43	—2,09	—1,84	—1,53

Примечание. Поправка ∇_r определялась по формуле $\nabla_r=36{,}85-\nabla_{cr}$.

Таблица 2

Результаты опытной откачки вблизи Грандайсленда при $Q=540$ *галл/мин* $=71{,}82$ *фут³/мин* ($\lambda=-0{,}75$; $n=0{,}727$; $T_D=7{,}35$ *фут²/мин*; $T=10{,}11$ *фут²/мин*)

$\lg t$, *мин*	Понижение S_{rt}, *фут*, по скважинам						
	№ 72	№ 13	№ 56	№ 2	№ 14	№ 58	№ 15
2,5	4,27	2,95	2,13	1,82	1,56	1,10	0,75
2,6	4,40	3,08	2,26	1,95	1,69	1,23	0,88
2,7	4,53	3,21	2,39	2,08	1,82	1,36	1,01
2,8	4,66	3,34	2,52	2,21	1,95	1,49	1,14
2,9	4,79	3,47	2,65	2,34	2,08	1,62	1,27
∇_r, *фут*	0	—0,03	—0,02	0,01	—0,08	—0,10	—0,14
r, *фут*	12,3	29,9	46,7	59,9	70,0	93,6	120,0
$\lg r$	1,090	1,476	1,669	1,777	1,845	1,971	2,079
i^*, *фут*	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
T, *фут²/мин*	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11
$\lg a$, *фут²/мин*	2,61	2,37	2,13	2,10	2,04	1,94	1,89
$\lg \mu = \lg (T/a)$	—1,61	—1,37	—1,13	—1,10	—1,04	—0,94	—0,89

Примечание. Поправка ∇_r определялась по формуле $\nabla_r=1810{,}28-\nabla_{cr}$.

точке r; $\ln a^0_r$, $\ln \mu^0_r=\ln(T/a^0_r)$ — соответственно отрезки осей $\ln a_r$ и $\ln \mu_r$, отсекаемые графиками $\ln a_r=f(\ln r)$ и $\ln \mu_r=f(\ln r)$.

Поскольку в теории линейной неустановившейся фильтрации $T_D=T$, для каждого опыта наряду с параметрами λ определялся и другой критерий линейности неустановившейся фильтрации [1, 2]

$$n = T_D/T = 2\,i/i_D = 2/(2-\lambda). \qquad (14)$$

В работах [1, 2] доказано, что если возмущать скважину различными по величине постоянными дебитами Q_1, Q_2, ..., Q_n, то величины критерия λ будут изменяться по определенному закону и принимать значения λ_1, λ_2, ..., λ_n, соответствующие указанным величинам Q. При этом в данном пласте график функции $\lambda=f(Q)$ пересекает ось Q только один раз, т. е. только при некотором одном значении $Q=Q_0$, когда $\lambda=0$, неустановившаяся фильтрация протекает согласно теории линейной фильтрации.

За пределами полосы $Q=Q_0$, т. е. при $Q<Q_0$ (здесь $\lambda>0$, $n>1$) и $Q>Q_0$ (здесь $\lambda<0$, $n<1$), имеют место квазилинейные разновидности неустановившейся фильтрации. Насколько часто встречаются на практике эти разновидности неустановившейся фильтрации, можно судить по следующим опытам.

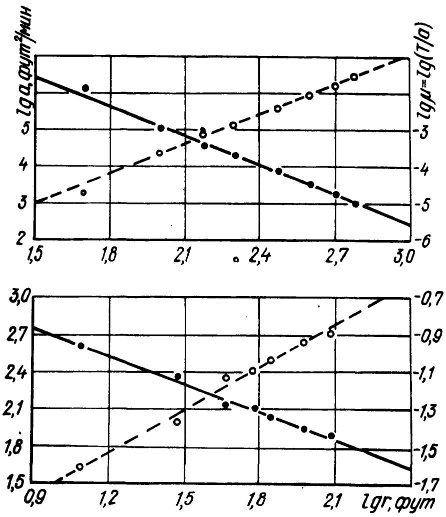

Рис. 1. Характер функций $\lg a=f(\lg r)$ (сплошные линии) и соответствующих им зависимостей $\lg\mu=\lg\ (T/a)=f(\lg r)$ (пунктирные), построенных по данным опытных откачек Л. К. Венцеля:

1 — откачка вблизи Скоттсблафа, *2* — откачка вблизи Грандайсленда (см. табл. 1, 2).

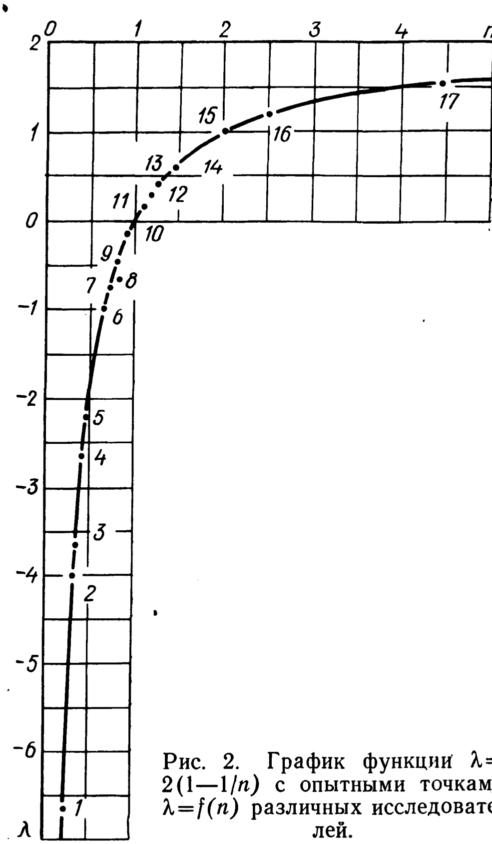

Рис. 2. График функции $\lambda=2(1-1/n)$ с опытными точками $\lambda=f(n)$ различных исследователей.

Например, откачка вблизи Скоттсблафа (табл. 1) показывает, что при данном дебите критерии неустойчивости фильтрационного потока $\lambda=-2{,}65$, $n=0{,}43$ и функции (11) и (12) имеют вид (рис. 1):

$$\lg a_r = 10{,}39 - 2{,}65\cdot\lg r,\quad a_r = 10^{10{,}39}\, r^{-2{,}65},\ \text{фут}^2/\text{мин};$$

$$\ln \mu_r = -8{,}94 + 2{,}65\cdot\lg r,\quad \mu_r = 10^{-8{,}94} r^{2{,}65}.$$

Аналогичным методом обработано множество других опытных откачек, результаты которых удовлетворяют уравнениям (6) и (7). Опытные значения λ и n приведены на графике функции (14) (рис. 2). Номера точек $\lambda=f(n)$ соответствуют опытам: *1* — откачка на ферме Вортман, $Q=72$ *фут³/мин* [9]; *2* — откачка в долине реки Арканзас, $Q=93$ *фут³/мин* [10]; *3* — см. [11], узел скважин 21 г при $Q=2600$ *м³/сут*; *4* — табл. 1; *5* — откачка вблизи Брэдфорда в марте 1962 г., $Q=55$ *фут³/мин* [12]; *6* — откачка из скважины 3 ц, $Q=288$ *м³/сут* [13]; *7* — табл. 2; *8* — см [14, табл. 19]; *9* — см. [15], скважины 13, 26 и др.; *10* — см. [14, табл. 13]; *11* — см. [16]; *12* — табл. 3, $Q=240$ *м³/сут*; *13* —

Таблица 3

Результаты опытной откачки из скважины 2ц радиуса $r_0=0{,}08$ *м* при $m=20$ *м* ($r_1=3$ *м*; $r_2=50{,}2$ *м*; $r_3=102$ *м*; длина фильтра 13,26 *м*; глубина скважины 110 *м* [8])

Q, *м³/сутки*	t, сутки	Понижение S_{rt}, *м*, по скважинам 2ц	r_1	r_2	r_3	T_D	$\frac{\lambda}{n}$
134	1	9,92	0,63	0,35	0,29	220,8	$\frac{0{,}42}{1{,}27}$
	2	11,47	0,67	0,39	0,33		
	3	12,22	0,70	0,42	0,36		
	4	12,97	0,72	0,44	0,38		
	5	13,34	0,73	0,45	0,39		
	6	13,86	0,74	0,46	0,40		
	i^*, *м*	5,051	0,141	0,141	0,141		
	T	4,855	173,9	173,9	173,9		
	$\lg a$	—0,585	5,078	5,532	5,727		
	$\lg \mu = \lg (T/a)$	1,272	—2,838	—3,292	—3,487		
180	1	14,59	1,74	1,34	1,25	205,3	$\frac{0{,}61}{1{,}44}$
	2	16,10	1,81	1,41	1,32		
	3	16,97	1,85	1,45	1,36		
	4	17,59	1,88	1,48	1,39		
	5	18,40	1,90	1,50	1,41		
	6	18,62	1,92	1,02	1,43		
	i^*, *м*	5,167	0,231	0,231	0,231		
	T	6,375	142,6	142,6	142,6		
	$\lg a$	0,274	8,142	8,851	9,081		
	$\lg \mu = \lg (T/a)$	0,530	—5,988	—6,697	—6,93		
240	1	20,50	2,11	1,54	1,40	188,7	$\frac{0{,}28}{1{,}16}$
	2	22,22	2,19	1,62	1,48		
	3	23,32	2,24	1,67	1,52		
	4	23,97	2,27	1,70	1,55		
	5	24,59	2,30	1,73	1,59		
	6	25,00	2,32	1,75	1,61		
	i^*, *м*	5,77	0,27	0,27	0,27		
	T	7,613	162,7	162,7	162,7		
	$\lg a$	1,003	8,425	8,754	8,860		
	$\lg \mu = \lg (T/a)$	—0,12	—6,21	—6,54	—6,64		

табл. 3, $Q=134$ *м³/сут; 14* — табл. 3, $Q=180$ *м³/сут; 15* — см. [17], $Q=2000$ *м³/сут*; *16* — откачка вблизи Элмвейла в июне 1960 г., $Q=48{,}2$ *фут³/мин* [12]; *17* — см. [18], скважины 1854, 2101.

Из рис. 2 видно, что критерий (или признак) неустойчивости фильтрационного потока λ во всех рассмотренных опытах принимает ненулевые значения, изменяясь от — 6,66 до + 1,55. Это говорит о том, что при изменении интенсивности возмущения в водоносных пластах возникают две квазилинейные разновидности неустановившейся фльтрации, характеризующиеся квазилинейными уравнениями параболического типа

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} S) = f(\lambda)\,\frac{1}{a}\,\frac{\partial S}{\partial t}, \qquad (15)$$

в которых роль критерия неустойчивости потока играет коэффициент $f(\lambda)=\varphi(Q)$ при скорости изменения уровня (пластового давления).

Очевидно, только в некоторой узкой полосе значений расхода потока $Q=Q_0$, когда $f(\lambda)=1$, квазилинейные разновидности неустановившейся фильтрации автоматически переходят в линейную разновидность неустановившейся фильтрации, а характеризующие их неустойчивые параметрические уравнения (15) — в линейное уравнение (3), которое также неустойчиво и за пределами полосы $Q=Q_0$ взаимно переходит в уравнения (15). Отсюда следует, что рассматриваемый эффект неустойчивости фильтрационного потока распространяется на все три разновидности неустановившейся фильтрации, а линейная неустановившаяся фильтрация является частным и весьма редким случаем квазилинейных разновидностей неустановившейся фильтрации. Это значит, что в одном и том же водоносном пласте при изменении интенсивности возмущения могут возникать как линейная (в полосе $Q=Q_0$), так и квазилинейные (за полосой $Q=Q_0$) разновидности неустановившейся фильтрации.

В работах [1, 2] доказано, что при соблюдении условий (6) и (7) функции (11) и (12) имеют место, если предположить, что величины неустановившегося радиуса влияния скважины R_t и параметров T_D, T, a, определенные по формулам теории линейной фильтрации, являются функциями дебита скважины Q. С другой стороны, зависимость величин R_t, T_D, T, a от Q имеет место, если движение подземных вод подчиняется обобщенному закону Дарси ($I_0 \neq 0$), а характеризуется по формулам линейной фильтрации ($I_0=0$) [3]. Отсюда можно заключить, что при условии $\lambda \neq 0$, имевшем место в рассмотренных опытах (рис. 2), движение подземных вод подчинялось обобщенному закону Дарси и вытекающей из него теории квазилинейной фильтрации.

Таким образом, анализ результатов опытных откачек позволяет предположить, что в каждом пласте начальный градиент фильтрации I_0 принимает нулевое значение только в некоторой узкой полосе значений расхода потока, лежащих по обе стороны от точки Q_0.

Возникновение I_0 вносит существенные изменения в методы решения обратных задач теории квазилинейной и нелинейной фильтрации. Например, в законе Дарси коэффициент фильтрации k_l равен угловому коэффициенту прямой $v=k_l I$, проходящей через начало координат (v — установившаяся скорость фильтрации при установившемся градиенте напорного потока I), т. е. при наличии закона Дарси коэффициент фильтрации определяется по одному значению расхода потока $k_l=v_1/I_1=$ $=v_2/I_2=...=v_n/I_n=\text{const}$.

Совершенно иная методика определения параметров пластов должна применяться при других законах фильтрации. Например, при обобщенном законе Дарси коэффициент фильтрации k_d равен угловому коэффициенту прямой $v=k_d(I \pm I_0)$, отсекающей на оси градиентов отрезок $\pm I_0$ [3]. Поэтому величина k_d определяется уже по двум значениям расхода потока: $k_d=(v_2-v_1)/(I_2-I_1)=\text{const}$. Это значит, что при опытных откачках в случае обобщенного закона Дарси возмущающая скважина должна включаться в работу с различными дебитами не менее двух раз. Только в этом случае в каждой точке пласта мы будем иметь не менее двух градиентов депрессионной поверхности (I_1, I_2, ...) при соответствующих расходах потока (v_1, v_2, ...). Отмеченные особенности практического использования обобщенного закона Дарси необходимо учитывать при проведении опытно-фильтрационных работ.

Таким образом, обобщение натурных исследований неустановившейся фильтрации к скважинам показывает (рис. 1, 2), что расчет неустановившейся депрессионной поверхности при работе вертикального дренажа необходимо вести с учетом уравнений (11) и (12), т. е. по обобщенной формуле [2]

$$S_{rt}=\frac{Q}{4\pi T}\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^{2-\lambda}}{4a_r^0 t}\right)\right]=\frac{Q}{4\pi T}\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^2}{4a_r t}\right)\right]. \qquad (16)$$

При $\lambda=0$, т. е. в некоторой узкой полосе значений Q, из (16) получаем формулу Ч. В. Тейса (1). Отметим, что обобщенная формула (16) представляет собой автомодельное решение квазилинейного уравнения параболического типа

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial S}{\partial r} = \frac{(2-\lambda)^2}{4a_r^0 r^\lambda}\cdot\frac{\partial S}{\partial t} \qquad (17)$$

для краевых условий задачи Тейса [1, 2].

Существование уравнения (11) свидетельствует о том, что неустановившееся движение подземных вод в одном и том же водоносном горизонте носит весьма сложный характер и лишь в некоторых случаях, когда $\lambda=0$, согласуется с теорией линейной фильтрации. Можно полагать, что закономерность (11) возникает в результате воздействия на распространение депрессионной воронки таких мало изученных явлений, как начальный градиент напора I_0 и режим водного питания пласта. При изменении интенсивности возмущения эти явления влияют на граничные условия пласта, иначе режим питания пласта становится неустойчивым. В частности, с изменением интенсивности отбора жидкости из пласта начинает перемещаться контур питания или приведенный радиус влияния R_t [4]. Обобщенная формула (16) указывает на зависимость величины R_t от дебита скважины Q

$$R_t=(2{,}25\, a_r^0 t)^{1/(2-\lambda)}, \qquad (18)$$

поскольку $\lambda=f(Q)$ [2].

В заключение отметим, что обнаруженные зависимости получены из анализа многочисленных натурных опытов и, следовательно, отражают определенные закономерности перераспределения напора в неустановившемся фильтрационном потоке. На этом основании уравнение (11) и вытекающие из него положения могут быть использованы для построения более реальных моделей неустановившегося движения подземных вод.

Литература

1. *Костюкович П. Н.* Исследование неустановившейся фильтрации в неограниченном пласте. — В сб.: Использование водных ресурсов. Минск, 1969. 2. *Костюкович П. Н.* Некоторые обобщения основной формулы теории упругого режима. — «Труды БСХА. Мелиорация и гидротехника», 1971, т. 81. 3. *Костюкович П. Н.* К определению обобщенного сопротивления водопонижающих скважин. — В сб.: Вопросы водохозяйственного строительства. Минск, 1969. 4. *Щелкачев В. Н.* Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М., 1959. 5. *Бочевер Ф. М.* и др. Основы гидрогеологических расчетов. М., 1965. 6. Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем. Под ред. Н. Н. Веригина. М., 1970. 7. *Wenzel L.* K. Methods for determining permeability of water-bearing materials.—Jn: U. S. Geological Survey water-Supply Paper 887. Wachington, 1942. 8. *Костюкович П. Н.* Гидрогеологические расчеты дрен и параметров водоносных горизонтов. Канд. дис. Л., 1965. 9. *Hantuch M. S.* Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers.—„Fransactions American Geophysical Union", 1956, v. 37, № 6. 10. *Hantuch M. S.* Analysis of data from pumping wells near a river.—„Journal of Geophysical Research", 1959, V. 64, № 11. 11. *Бочевер Ф. М., Орфаниди К. Ф.* Опыт определения исходных гидрогеологических параметров для оценки эксплуатационных запасов подземных вод. — «Труды лаборатории инженерной гидрогеологии», 1962, вып. 4. 12. *Watt A. K.* An assessment of the non-equilibrium equations in various aquifers.—In: Proce edings of Hydrology Symposium Held at the University of Alberta. Ground Water", Ottawa, 1963. 13. *Костюкович П. Н.* Об исходных предпосылках при определении промежутка высачивания и параметров пластов. — «Изв. вузов. Геология и разведка», 1966, № 3. 14. *Биндеман Н. Н.* Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., 1963. 15. *Самсонов Б. Г., Бурдакова О. Л., Кривошеева Л. И.* Сравнительная оценка способов определения расчетных гидрогеологических параметров. — «Разведка и охрана недр», 1970, № 9. 16. *Плотников Н. И.* Поиски и разведка пресных подземных вод для целей крупного водоснабжения. М., 1968. 17. *Боревский Л. В., Язвин Л. С.* К методике определения гидрогеологических параметров в неоднородных в плане пластах. — «Труды ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии», 1970, вып. 32. 18. *Латышев П. П.* Определение гидрогеологических параметров по данным режимных наблюдений. — «Труды ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии», 1969, вып. 23.