ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտություններ, հատոր XXXI, № 2, 1978 Серия технических наук

ГИДРАВЛИКА

Н. Л. МЕЛИКЯН

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ФОНТАНИРУЮЩИХ СКВАЖИН

Опыт эксплуатации фонтанирующих скважин Араратской равнины показывает, что их дебит и высота фонтана по времени снижаются, а расчетные формулы для определения закономерностей их изменения отсутствуют.

Рассмотрим приток подземных вод к одиночной фонтанирующей скважине, размещенной в неограниченном в плане напорном водоносном пласте постоянной мощности.

Движение подземных вод к одиночной скважине для однородного напорного пласта описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial H}{\partial r}=\frac{1}{a}\frac{\partial H}{\partial t}, \qquad r=\sqrt{x^2+y^2}, \tag{1}$$

где a — коэффициент пьезопроводности; H — пьезометрический напор в точке с координатами (x, y) в момент времени t.

Для фонтанирующих скважин задача сводится к решению уравнения (1) при следующих краевых условиях (рис. 1):

$$H(r, 0)=H(\infty, t)=H_e=\text{const}, \tag{2}$$

$$\left(r\frac{\partial H}{\partial r}\right)\Big|_{r=r_0}=\frac{Q(t)}{2\pi km}. \tag{3}$$

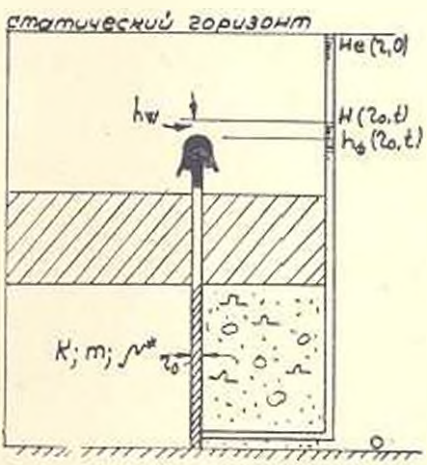

Рис. 1. Расчетная схема.

где k — коэффициент фильтрации водоносного пласта; m — ее мощность. Дебит фонтана $Q(t)$ выражается следующим образом:

$$Q(t)=\varphi\pi r_0^2\sqrt{2g\,|H(r_0, t)-H_0|}, \qquad H_0<H(r_0, t)\leqslant H_e, \tag{4}$$

где H_e — напор подземных вод в естественных условиях ($t=0$); H_0 — отметка устья скважины; $H(r_0, t)$ — напор в скважине; r_0 — радиус скважины; φ — коэффициент скорости движения воды в стволе скважины,

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}}; \tag{5}$$

$$\xi = \lambda \frac{l_{вс}}{2r_0}; \tag{6}$$

λ — коэффициент Дарси; $l_{вс}$ — длина водоприемной части скважины.

Теоретическое решение уравнения (1) при краевых условиях (2) — (3) пока не получено. Возникающие трудности при этом связаны с нелинейностью краевого условия (3).

В АрмНИИВПиГ под руководством проф. А. К. Ананяна, методом математического моделирования на гидроинтеграторе разработан способ решения уравнения (1) при краевых условиях (2)—(3).

При решении уравнения (1) этим методом ,с краевыми условиями $Q = \text{const}$ или $H(r_0) = \text{const}$ скважины моделируются через дополнительные сопротивления [5]. Для фонтанирующих же скважин, кроме этого, необходимо моделировать радиус скважины таким образом, чтобы на модели удовлетворялись краевые условия (2) — (3).

Масштабный коэффициент радиуса скважины для моделирования на гидроинтеграторе, исходя из условия фонтана, определяется так. Для натуры и модели высоту фонтана можно представить формулой:

$$h_ф = \frac{v^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g\pi^2 r_0^4}. \tag{7}$$

Написав зависимость (7) для натуры (H) и для модели ($м$) и разделив первое уравнение на второе, найдем:

$$\alpha_{r_0}^4 = \frac{\alpha_h^2}{\alpha_Q^2}, \tag{8}$$

где $$\alpha_{r_0}^4 = \left(\frac{r_0^н}{r_0^м}\right)^4; \quad \alpha_Q = \frac{Q_н}{Q_м}; \quad \alpha_h = \frac{h_ф^н}{h_ф^м}; \tag{9}$$

α_{r_0}, α_Q, α_h — соответственно, масштабные коэффициенты для радиуса, расхода и напора.

Масштабные коэффициенты связаны соотношением:

$$\alpha_Q = \frac{\alpha_h}{\alpha_\rho}, \tag{10}$$

где α_ρ — масштабный коэффициент фильтрационных сопротивлений.

Вводя значение α_Q из (10) в (8), получим:

$$\alpha_{r_0} = \sqrt[4]{\frac{\alpha_h}{\alpha_\rho^2}}. \tag{11}$$

Так как движение воды зависит и от температуры (T), то результаты решения задач для различных T при помощи поправочного коэффициента ε приводятся к $T_0 = 15°C$.

Для расхода скважины имеем:

$$Q|_{T=T_0} = {}^{1}Q|_{T=T_1}. \tag{12}$$

С учетом (12), согласно (7), высота фонтана при $T_0 = 15°C$ будет:

$$h_\Phi|_{T=T_0} = e^{\beta} h_\Phi|_{T=T_1}, \tag{13}$$

здесь $h_\Phi|_{T=T_1}$ определяется согласно (7).

Этим методом мы решили систему (1)—(3) для гидрогеологических условий Араратской равнины. Исходными данными приняты параметры скважины [31], находящейся на Харатлукском участке Араратской равнины. Результаты моделирования хорошо согласуются с натурными данными и поэтому стало возможным решать обобщенную задачу.

Исследована работа фонтанирующей скважины (совершенной и несовершенной) в напорном водоносном пласте при различных значениях гидрогеологических параметров, радиуса скважины, а также коэффициента несовершенства ξ. В общей сложности рассмотрено 24 случая, которые были разбиты на определенные группы. Для каждого случая измерялись дебит скважины, высота фонтана и понижение напора в водоносном пласте в различные моменты времени. Дебит фонтанирующих скважин можно представить в следующем виде:

$$Q(t) = f_1(k,\ m,\ \mu^*,\ r_0,\ H_{\text{п.}i}). \tag{14}$$

где μ^* — коэффициент упругой водоотдачи; $H_\text{п} = (H_\text{с} - H_0)$ — начальный положительный напор.

Используя метод А. Л. Лангаара, получаем основные безразмерные комплексы, состоящие из параметров, характеризующих процесс фильтрации, а именно:

$$\tau_1 = \overline{Q} = \frac{Q}{kmH_\text{п}}, \qquad \tau_2 = \tau_0 = \frac{kmt}{\mu^* r_0^2} = \frac{at}{r_0^2}, \qquad a = \frac{km}{\mu^*}. \tag{15}$$

Согласно II — теореме функция f_1 также представляет зависимость между комплексами $\overline{Q}$ и τ_0. Чтобы найти зависимость f_1, построим функцию $\overline{Q} = f(\ln \tau_0)$ (рис. 2).

Полученные точки хорошо ложатся на кривую, уравнение которой ищем в форме

$$y = dx^b \exp(cx), \qquad y = \overline{Q}, \qquad x = \ln \tau_0. \tag{16}$$

где d, b, c — постоянные коэффициенты.

Для определения коэффициентов d, b, c применен метод наименьших квадратов. Тогда получим:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} [(\ln d + b \ln x_i + c x_i) - \ln y_i] = 0, \\ \sum_{i=1}^{n} [(\ln d + b \ln x_i + c x_i) - \ln y_i] \ln x_i = 0, \\ \sum_{i=1}^{n} [(\ln d + b \ln x_i + c x_i) - \ln y_i] x_i = 0, \end{cases} \tag{17}$$

где n — число точек, нанесенных на графике.

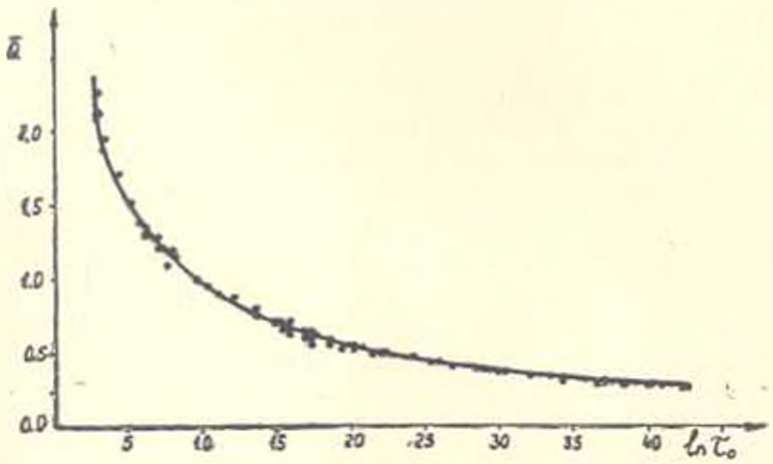

Рис. 2. Зависимость $\bar{Q} = f(\ln \tau_0)$.

Решая систему уравнений (17), найдем:

$$d = 4{,}902; \quad b = -0.67226; \quad c = -0{,}008864.$$

Тогда дебит скважин, согласно (15)—(16) будет:

$$Q(t) = \frac{4\pi k m H_0}{R}; \tag{18}$$

$$R = 2{,}563\tau_0^{a_2} (\ln \tau_0)^{a_1}; \quad a_1 = 0.008864; \quad a_2 = 0{,}67227. \tag{19}$$

Несовершенство скважины приближенно можно учесть, вводя приведенный радиус скважины

$$r_{пр} = r_0 e^{-\xi}, \tag{20}$$

где ξ — коэффициент несовершенства скважин по степени и характеру вскрытия пласта.

Аналогично (14), для понижения напора в водоносном пласте можно написать:

$$S = f_3(Q, k, m, \mu^*, r, t). \tag{21}$$

По методу А. Л. Лангаара получаем следующие безразмерные комплексы:

$$\pi_1 = \overline{Q}^* = \frac{Q}{kmS}; \qquad \pi_2 = \tau = \frac{kmt}{\mu^* r^2} = \frac{at}{r^2}. \tag{22}$$

Для нахождения функциональной связи между комплексами построен график функции $\overline{Q}^* = f(\tau)$ (рис. 3).

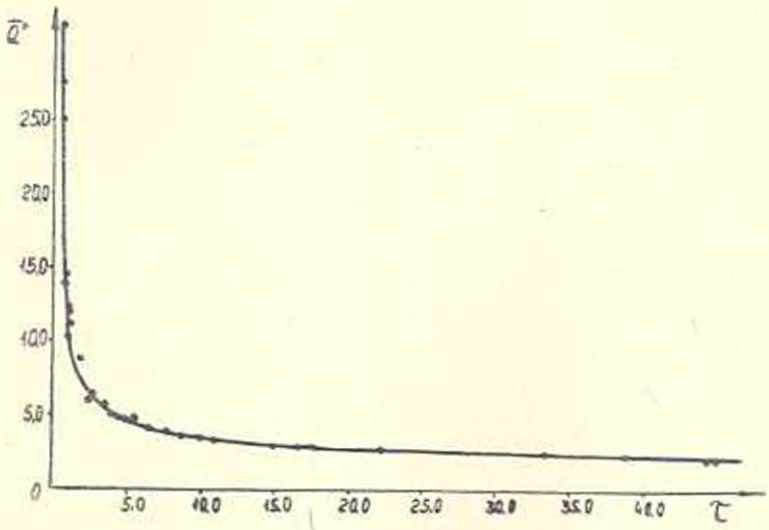

Рис. 3. Зависимость $\overline{Q} = f(\tau)$.

Поступая аналогично предыдущему, находим:

$$S = -\frac{Q(t)\,\tau^{0.05}}{4\pi km}\,Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right). \tag{23}$$

Подставляя сюда значение $Q(t)$ из (18), получим:

$$S = -\frac{H_\text{п}}{R}\,\tau^{0.05}\,Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right). \tag{24}$$

Понижение напора в скважине можно представить в виде:

$$S(r_0,\ t) = H_\text{п} - h_\text{ф}. \tag{25}$$

С целью оценки применяемости предлагаемых формул проведены расчеты по определению дебита по (18) и понижения уровня по (25) фонтанирующих скважин, размещенных у села Харатлу, и результаты расчета сравнены с данными натурных измерений, выполненных ПНИИИС-ом [4]. Результаты расчетов приводятся в табл. 2.

Исходные данные для расчета дебита самоизливающихся скважин излагаются в табл. 1.

Таблица 1

№№ скважин	H, *м*	m, *м*	k, *м/сут*	μ^*	$r_в$, *м*	Длина фильтра, *м*	Длина скважины, *м*	ζ
121[1]	18,65	50	65	0,04	0,15	23	83	3
125	13,9	87	163	0,01	0,15	21	120	14
127	7,5	30	52	0,04	0,15	24,5	60	2,8
130	10,85	38	43	0,01	0,15	35,5	74,5	3,5
135	20,1	50	150	0,04	0,175	33	13	4
136	10,25	80	74	0,04	0,15	35	115	8,7

[1] При вычислении коэффициента ζ учтены несовершенства скважин по степени вскрытия пласта и потери по длине скважины.

Таблица 2

№№ скважин	t, сутки	Дебит скважин, *л/сек*		Ошибка, $\gamma_1 = \frac{[3]-[4]}{[3]}\cdot 100\%$	Понижение напора в скважинах		Ошибка, $\gamma_2 = \frac{[6]-[7]}{[6]}\cdot 100\%$
		по измерениям	по формуле (18)		по измерениям	по формуле (25)	
121[2]	1	215	241	—12	18,6	18,1	2,75
125	1	525	560	—6,6	12,75	11,1	5,1
127	1	75	74	1,3	6,65	7,2	—8,4
127	365	52	58	—10,9	—	7,35	—
130	1	102	104	—2	10,85	10,85	0,09
	107	100	87	13	—	10,843	—
	202	79	82,7	—4,1	—	10,845	—
	238	77	82	—6,1	—	10,845	—
	307	77	81	—5,2	—	10,846	—
135	1	825	822	0,4	19,5	16,28	16,5
136	1	250	2 5	2	9,95	9,64	3,1

Проверка формулы (23) выполнена на основании результатов работы скважины 131[2], которая с помощью крановой системы могла работать в разных режимах фонтанирования. Водоносный пласт, в котором заложена эта скважина, имеет следующие параметры: $m = 90$ *м*; $k = 66$ *м/сут*; $H = 21{,}75$ *м*; $\mu^* = 0{,}040$; $a = 1{,}49 \cdot 10^5$ *м²/сут*.

Результаты натурных измерений понижения напора в наблюдаемых скважинах и по формуле (24) приводятся в табл. 3.

Данные табл. 2 показывают, что абсолютная ошибка при определении дебита скважины по формуле (18) не превышает 7%, а при определении понижения уровня в скважинах — 9%. В случае нахождения понижения уровня в наблюдательной скважине ошибка возрастает до 15%. Однако, при больших дебитах эта ошибка в 2—3 раза уменьшается (табл. 3).

Таблица 3

Фонтанирующая скважина	Продолжительность фонтанирования	Дебит скважины, *л/сек*	№№ наблюдат. скважин	Расстояние от скважины —131[а] до наблюдат., *м*	Понижение напора в *м*		
					по наблюдениям	по формуле (24)	ошибка, $\frac{[6]-[7]}{[6]}\cdot 100\%$
131[а]	58 часов 40 мин.	750	133	40	7,74	7,2	7
			129	790	0,5	0,52	−6
			121	930	0,4	0,38	5
			124	1030	0,3	0,29	3,3
	52 часа		500	133	40	4,1	5,04	14,5

Если учесть, что при определении фильтрационных свойств водоносных пород обычно допустимая ошибка намного больше, чем вышеуказанные, то можно считать, что полученные формулы вполне пригодны для инженерных расчетов.

АрмНИИВПиГ

Поступило 18.IV.1977

Ն. Լ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ

ՇԱՏՐՎԱՆՈՂ ՀՈՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՀԱՐՑԻ ՄԱՍԻՆ

Ամփոփում

Հոդվածում լուսաբանված են առաձգական ջրապարունակող շերտում միակ շատրվանող հորի հաշվարկի հարցերը ֆիլտրացիայի ոչ ստացիոնար ռեժիմի դեպքում։

Մշակված է եղանակ, որի օգնությամբ հիդրոինտեգրատորի վրա մաթեմատիկական մոդելավորման մեթոդով լուծված է շատրվանող հորի ընդհանրացված խնդիրը։

Օգտագործելով չափողականությունների տեսությունը և նվազագույն քառակուսիների մեթոդը, ստացված են հաշվարկային բանաձևեր, որոնց միջոցով կարող են որոշվել հորի ջրի ծախսը և ճնշման անկումը ջրապարունակող շերտում ցանկացած պահին։

Այդ բանաձևերի ստուգումը բնական տվյալներով ցույց է տալիս, որ նրանք ապահովում են անհրաժեշտ ճշտություն և նրանց կարելի է առաջարկել շատրվանող հորերի հաշվարկների համար։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аннян А. К.* Дренаж при освоении содовых солончаков. Изд. «Колос», М., 1971.
2. *Васильев С. В., Веригин Н. Н., Глейзер Б. А.* и др. Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем. Изд. «Колос», М., 1970.
3. *Демидович Б. П.* и др. Численные методы анализа. Изд. «Наука», М., 1967.
4. ПНИИИС. Отчет о результатах изысканий подземных вод на центральном участке Араратской равнины (с.с. Харатлу—Агамазалу). Ч. I, II, 1966.
5. *Шестаков В. М.* Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. Изд. МГУ, М., 1965.