

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. М., Гостехиздат, 1960.
2. Чекалюк Э. Б. Псевдокритические параметры фильтрации. Нефтяное хозяйство, 1947, № 9.
3. Минский Е. М. О турбулентной фильтрации газа в пористых средах. Сб. «Вопросы добычи, транспорта и переработки приточных газов». М.—Л., 1951.
4. Николаевский В. Н. О подобии в среднем микроструктур поровых пространств. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1960, № 4.
5. Коваленко Э. К., Крашенинников Ю. Н. О пределе применимости закона Дарси. М., «Недра». Тр. Уфимск. нефтяного н.-и. ин-та, 1967, вып. 17.
6. Фенчер Д., Льюис Д., Берно К. Физические испытания пород нефтяных и газовых пластов. Иностр. нефтяная техн., 1934, вып. 105.
7. Жаворонков Н. М., Аэров М. Э., Умник Н. Н. Гидравлические сопротивления и плотность упаковки зернистого слоя. Ж. физ. химии, 1949, т. 23, вып. 3.
8. Трехбин Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах М., Гостехиздат, 1959.
9. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М., Гостехиздат, 1947.
10. Инструкция по исследованию газовых скважин. М., Гостехиздат, 1961.

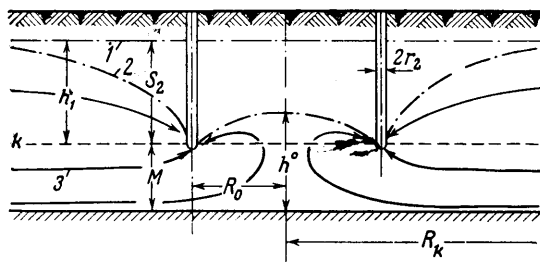
ПРИТОК ПОДЗЕМНЫХ ВОД К КОЛЬЦЕВОМУ НЕСОВЕРШЕННОМУ ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ДРЕНАЖУ

А. Ж. МУФТАХОВ

(Челябинск)

Кольцевые несовершенные горизонтальные дренажи находят широкое применение при защите промышленных площадок и жилых массивов от подтопления подземными водами. Они представляют собой дренажную траншею, пройденную по периметру защищаемого контура, заполненную для приема и отвода воды хорошо фильтрующим материалом. Решение задачи о нестационарной фильтрации воды к таким дренажам позволяет оценить их эффективность, т. е. определить величину притока и положения уровня подземных вод в произвольной точке водоносного пласта, в том числе в центре дренируемого контура, в любой момент времени.

При работе кольцевого несовершенного горизонтального дренажа поступающий в него поток является пространственным, а уровень подземных вод в центре дренируемого контура постепенно опускается, пока не займет установившегося положения (несколько выше, чем уровень в самых дренажах; фиг. 1). Вопрос о фильтрационном расчете кольцевых дренажей в условиях установившегося движения исследован [1], для неустановившейся фильтрации решения отсутствуют. Ниже решается задача о



Фиг. 1. Схема кольцевого несовершенного горизонтального дренажа в безнапорных водах: 1 — уровень подземных вод до работы дренажа, 2 — кривая депрессии при работе дренажа, 3 — линии токов

Здесь ρ — радиус-вектор, a — коэффициент пьезопроводности, k — коэффициент фильтрации, t — время.

Будем считать, что кольцевой несовершенный горизонтальный дренаж образован из бесчисленного множества точечных стоков, равномерно распределенных по цилиндрической поверхности радиуса R_0 и высотой h_0 . Тогда, если полный приток воды

неустановившейся фильтрации подземных вод к кольцевому несовершенному горизонтальному дренажу исходя из потенциала точечного стока в пространстве.

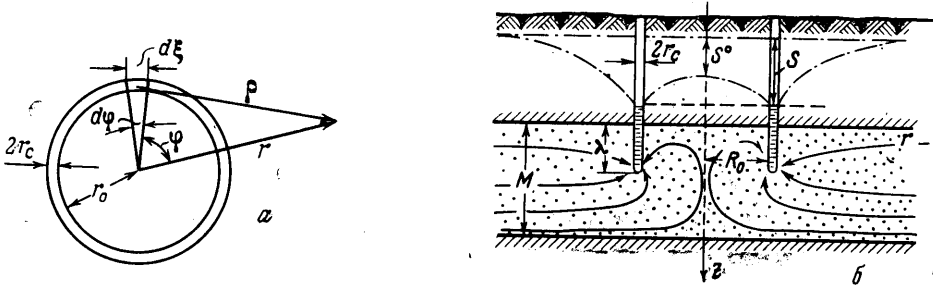
Понижение напора, вызываемое в производной точке пространства непрерывно действующим точечным стоком с дебитом q , определяется по формуле [2, 3]

$$S = \frac{q}{8\pi \sqrt{\pi} k \sqrt{a}} \int_0^t \exp \times \left[-\frac{\rho^2}{4a(t-\tau)} \right] \frac{d\tau}{(t-\tau)^{3/2}} \quad (1)$$

в дренаж равен Q , то элементу этой поверхности $d\sigma = R_0 d\varphi d\lambda$ соответствует дебит dQ , равный

$$dQ = \frac{Q}{2\pi R_0 \lambda_0} d\sigma = \frac{Q}{2\pi \lambda_0} d\varphi d\lambda \quad (2)$$

Этот дебит dQ в произвольной точке пространства вызовет понижение напора dS , которое определяется по (1). Понижение напора от рассматриваемого элемента



Фиг. 2. Схема кольцевого несовершенного горизонтального дренажа в напорном пласте: *a* — разрез, *б* — план

$d\sigma$ в напорном пласте конечной мощности M (Фиг. 2) может быть получено методом бесконечных зеркальных отображений, тогда [3]

$$dS = \frac{dQ}{8\pi \sqrt{\pi} k \sqrt{a}} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^t \exp \left[-\frac{\rho_{+n^2}}{4a(t-\tau)} \right] \frac{d\tau}{(t-\tau)^{3/2}} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^t \exp \left[-\frac{\rho_{-n^2}}{4a(t-\tau)} \right] \frac{d\tau}{(t-\tau)^{3/2}} \right\} \quad (3)$$

$$\rho_{\pm n^2} = R_0^2 + r^2 + (z \pm \lambda - 2nM)^2 - 2rR_0 \cos \varphi \quad (4)$$

С учетом (2) понижение напора в произвольной точке напорного пласта конечной мощности от действия дренажного кольца, работающего с дебитом Q , равно

$$S = \frac{Q}{16\pi^2 \sqrt{\pi} k \sqrt{a} \lambda_0} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^t \int_0^{2\pi} \int_0^{\lambda_0} \exp \left[-\frac{\rho_{+n^2}}{4a(t-\tau)} \right] \frac{d\tau d\varphi d\lambda}{(t-\tau)^{3/2}} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^t \int_0^{2\pi} \int_0^{\lambda} \exp \left[-\frac{\rho_{-n^2}}{4a(t-\tau)} \right] \frac{d\tau d\varphi d\lambda}{(t-\tau)^{3/2}} \right\} \quad (5)$$

Производя интегрирование [4] и преобразование рядов [5], получаем при $r < R_0$

$$S = \frac{Q}{4\pi k M} \left\{ \int_0^t \exp \left[-\frac{r^2 + R_0^2}{4a(t-\tau)} \right] I_0 \left(\frac{rR_0}{2a(t-\tau)} \right) \frac{d\tau}{t-\tau} + \frac{4}{\pi \lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} I_0(n\pi r) K_0(n\pi R_0) \cos n\pi z \sin n\pi \lambda_0 - 2\varphi^* \right\} \quad (6)$$

при $r > R_0$

$$S = \frac{Q}{4\pi k M} \left\{ \int_0^t \exp \left[-\frac{r^2 + R_0^2}{4a(t-\tau)} \right] I_0 \left(\frac{rR_0}{2a(t-\tau)} \right) \frac{d\tau}{t-\tau} + \frac{4}{\pi \lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} I_0(n\pi R_0) K_0(n\pi r) \cos n\pi z \sin n\pi \lambda_0 - 2\varphi^* \right\} \quad (7)$$

В формулах (6) и (7)

$$\varphi^* = \frac{1}{\pi\lambda_0} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} \cos n\pi\bar{z} \sin n\pi\bar{\lambda}_0 \int_{\beta}^{\infty} \exp\left[-\frac{x}{2} - \frac{n^2\pi^2(\bar{r}^2 + \bar{R}_0^2)}{2x}\right] I_0\left(\frac{\bar{r}\bar{R}_0 n^2\pi^2}{x}\right) \frac{dx}{x} \quad (8)$$

$$\bar{r} = \frac{r}{M}, \quad \bar{R}_0 = \frac{R_0}{M}, \quad \bar{\lambda}_0 = \frac{\lambda_0}{M}, \quad \bar{z} = \frac{z}{M}, \quad \beta = \frac{2\pi^2 n^2 a t}{M^2}$$

Здесь $I_0(\xi)$, $K_0(\xi)$ — функции Бесселя первого и второго ряда мнимого аргумента. В частном случае в центре дренажа, т. е. при $r = 0$ и $z = 0$ в соответствии с (6) понижение напора будет определяться выражением

$$S_{ц} = \frac{Q}{4\pi k M} \left[-Ei\left(-\frac{R_0^2}{4at}\right) + 4\varphi_0 - 2\varphi_0^* \right] \quad (9)$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} K_0(n\pi\bar{R}_0) \sin n\pi\bar{\lambda}_0 \quad (10)$$

$$\varphi_0^* = \frac{1}{\pi\bar{\lambda}_0} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} \sin n\pi\bar{\lambda}_0 \int_{\beta}^{\infty} \exp\left(-\frac{x}{2} - \frac{n^2\pi^2\bar{R}_0^2}{2x}\right) \frac{dx}{x} \quad (11)$$

$Ei(\xi)$ — интегральная показательная функция.

Так как величина β , начиная уже с малых моментов времени, велика, то φ_0^* близка к нулю и им при практических расчетах можно пренебречь. Тогда

$$S_{ц} = \frac{Q}{4\pi k M} \left[-Ei\left(-\frac{R_0^2}{4at}\right) + 4\varphi_0 \right] \quad (12)$$

Значения функции φ_0 приведены в табл. 1 для некоторых значений R_0/M и λ_0/M .

Таблица 1

λ_0/M	φ_0 при значениях R_0/M					λ_0/M	φ_0 при значениях R_0/M				
	0.1	0.5	1.0	2.0	5.0		0.1	0.5	1.0	2.0	5.0
0	∞	∞	∞	∞	∞	0.5	2.442	0.389	0.058	0.002	0
0.1	9.051	0.708	0.0903	0.003	∞	0.75	0.878	0.167	0.027	0.0009	0
0.25	5.45	0.615	0.0832	0.00208	0	1.0	0	0	0	0	0

Понижение уровня в самом дренаже S^* получается из (6) или (7), если подставить в них $r = R_0$.

При этом оказывается, что вдоль вскрытой кольцевым дренажем части пласта понижение напора (а следовательно, и напор) непостоянны. Средняя величина понижения в дренаже может быть найдена путем интегрирования выражения (6) или (7) при $r = R_0$ по переменной z в пределах от 0 до λ_0 ; она равна

$$S^* = \frac{Q}{4\pi k M} \left\{ \int_0^{\lambda_0} \exp\left[-\frac{R_0^2}{4a(t-\tau)}\right] I_0\left(\frac{R_0^2}{2a(t-\tau)}\right) \frac{d\tau}{t-\tau} + \varphi_2 - \varphi_2^* \right\} \quad (13)$$

$$\varphi_2 = \frac{4}{\pi^2\lambda_0^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} I_0(n\pi\bar{R}_0) K_0(n\pi\bar{R}_0) \sin^2 n\pi\bar{\lambda}_0 \quad (14)$$

$$\varphi_2^* = \frac{2}{\pi^2\lambda_0^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} \sin^2 n\pi\bar{\lambda}_0 \int_{\beta}^{\infty} \exp\left[-\frac{x}{2} - \frac{n^2\pi^2\bar{R}_0^2}{x}\right] I_0\left(\frac{n^2\pi^2\bar{R}_0^2}{x}\right) \frac{dx}{x} \quad (15)$$

В то же время для гидродинамически совершенной скважины радиуса R_0 , как это показано в работах [6, 7], величина понижения напора определяется по формуле.

$$S_0 = \frac{Q}{4\pi kM} \int_0^t \exp \left[-\frac{R_0^2}{4a(t-\tau)} \right] I_0 \left(\frac{R_0^2}{2a(t-\tau)} \right) \frac{d\tau}{t-\tau} = \frac{Q}{4\pi kM} R_c \quad (16)$$

Пренебрегая величиной φ_2^* ввиду его малости, формулу (13) с учетом соотношения (16) представим в виде

$$S^* = \frac{Q}{4\pi kM} [R_c + \varphi_2] \quad (17)$$

Функцию φ_2 можно назвать дополнительным сопротивлением на несовершенство кольцевого дренажа; значения ее приведены в табл. 2.

Анализ формул (14), (15) показывает, что дополнительное сопротивление на несовершенство кольцевого горизонтального дренажа лишь в начальный, весьма непродолжительный период зависит от времени и параметров пласта, в дальнейшем же оно определяется исключительно размерами дренажа и мощностью водоносного горизонта. Поэтому оно не зависит от рода граничных условий на стенке дренажа, т. е. будет одинаковым как при работе дренажа с постоянным расходом, так и при работе с постоянным понижением.

Тогда, воспользовавшись методом фильтрационных сопротивлений, можно получить достаточно простые формулы для определения дебита несовершенных кольцевых дренажей, работающих при режиме постоянного понижения;

в напорных пластах

$$Q = \frac{4\pi kMS^*R_c^*}{1 + R_c^*\varphi_2} \quad (18)$$

в безнапорных пластах

$$Q = \frac{2\pi k(2H_e - S^*)S_{gp}R_c^*}{1 + R_c^*\varphi_2} \quad (19)$$

Таблица 2

λ_0/M	φ_2 при значениях R_0/M					
	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
0	∞	∞	∞	∞	∞	∞
0.1	11.84	2.57	1.25	0.632	0.244	0.122
0.25	6.1	1.42	0.682	0.356	0.134	0.067
0.5	2.36	0.571	0.270	0.144	0.054	0.027
0.75	0.678	0.158	0.076	0.0396	0.0149	0.0075
1.0	0	0	0	0	0	0

Здесь R_c^* — показатель гидравлического сопротивления совершенной скважины радиуса R_0 , работающей при режиме постоянного понижения [8].

Таким образом, определение дебита кольцевого несовершенного дренажа, работающего при режиме постоянного уровня, производится сравнительно просто. Несколько сложнее производится вычисление понижения в центре дренажа. Непосредственное использование формулы (11) для этой цели невозможно, так как дебит со временем падает.

Поэтому необходимо поступать следующим образом. По известной величине понижения уровня воды в кольцевом несовершенном дренаже S_{gp} по формулам (18), (19) определяется дебит дренажа на различные моменты времени и строится график $Q - t$. Затем криволинейный график зависимости дебита от времени заменяется ступенчатым, когда в отдельные промежутки времени переменный дебит считается постоянным. Для каждого из этих промежутков времени зависимость (12) применяется в отдельности.

Тогда общая формула для определения величины S_{Σ} принимает вид:

в напорных водах

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{Q_i - Q_{i-1}}{4\pi kM} R(t - t_{i-1}) \quad (20)$$

в безнапорных водах

$$S_{\Sigma} = H_e - \left(H_e^2 - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{Q_i - Q_{i-1}}{2\pi k} R(t - t_{i-1}) \right)^{1/2} \quad (21)$$

$$R(t - t_{i-1}) = -Ei \left(-\frac{R_0^2}{4a(t - t_{i-1})} \right) + 4\varphi_0$$

Здесь n — количество интервалов, на которые разбивается криволинейный график $Q - t$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Муфтахов А. Ж. К вопросу о расчетах пластовых и кольцевых дренажей, применяемых в промышленном и городском строительстве. Вопросы гидрогеологических расчетов водозаборов и дренажей. М. Госстройиздат, 1963.
2. Бочеввер Ф. М., Веригин Н. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М., Госстройиздат, 1961.
3. Хейн А. Л. Теоретические основы и методика определения параметров пласта по данным испытания не совершенных скважин при неустановившемся режиме фильтрации жидкости и газа. Тр. н.-и. ин-та природных газов, М.—Л., Гостехиздат, 1953, вып. 5.
4. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1962.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., Гостехиздат, 1952.
6. Бочеввер Ф. М. Приближенные гидрогеологические расчеты крупных водозаборов и водопозитительных установок. М., Госстройиздат, 1963.
7. Пилатовский В. П. Взаимодействие круговых концентрических галерей, дренирующих пласт в условиях упругого режима. Инж. сб., 1953, т. 15.
8. Царевич К. А., Куранов И. Ф. Расчет дебитов центральной скважины в круговом пласте при упругом режиме. Тр. Всес. нефтегаз. н.-и. ин-та, 1956, вып. 8.

НАДЕЖДА МЕТВЕЕВНА СЕМЕНОВА

В ноябре этого года исполнилось 70 лет со дня рождения и 50 лет трудовой деятельности Надежды Матвеевны Семеновой — начальника отдела Центрального аэродинамического института и ученого секретаря жюри конкурса имени Н. Е. Жуковского.

Н. М. Семенова родилась в 1898 году в г. Саратове в семье известных большевик-подпольщиков. После учебы на Московских высших женских курсах и в МГУ с 1918 г. Надежда Матвеевна работает в ряде государственных учреждений молодой Советской республики (в Моссовете, Мосгуботделе труда, в Госплане). В 1932 году Н. М. Семенова поступает инженером в ЦАГИ.

С 1935 года Надежда Матвеевна под руководством С. А. Чаплыгина принимает непосредственное участие в подготовке первого издания полного собрания сочинений Н. Е. Жуковского в 16 томах.

В 1944—50 году в качестве члена редколлегии Н. М. Семенова проводит огромную работу по изданию полного собрания сочинений С. А. Чаплыгина и второго издания сочинений Н. Е. Жуковского в 7 томах, а также участвует в издании трудов С. А. Чаплыгина и Н. Е. Жуковского в серии «Классики естествознания» и их научных биографий.

История развития авиации, аэродинамики и газовой динамики еще не написана. Но когда это будет сделано, можно не сомневаться, выяснится особое значение труда Н. М. Семенович по собиранию и хранению наследия великих советских ученых Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина, а также результатов творчества воспитанной ими молодежи, сыгравших выдающуюся роль в создании мощной авиации Советского Союза.

Много сделано Н. М. Семенович в подборе, обработке и издании материалов по истории авиационной науки в нашей стране. Огромную настойчивость и энтузиазм проявила Надежда Матвеевна в создании научно-мемориального музея Н. Е. Жуковского, которому она отдает весь свой талант и знания. Экспозиция этого музея, разработанная под руководством Н. М. Семенович, получила высокую оценку представителей авиационной общественности и пользуется заслуженной известностью в нашей стране и за рубежом, а сам музей стал всесоюзным центром по истории советской авиационной науки и техники.

Самоотверженная и неутомимая деятельность Н. М. Семенович помогла сохранить для истории память о многих выдающихся событиях в развитии отечественной авиации, участницей которых она была.

Надежда Матвеевна, талантливый историк науки, обладает глубокими специальными знаниями, широким научным кругозором, что придает ее работе истинно творческий характер.

Многие поколения авиационных специалистов ценят в лице Надежды Матвеевны человека с огромной эрудицией и опытом, сочетающего чуткое, внимательное, гуманное отношение к людям и неизменную доброжелательность с высокой научной принципиальностью.

Редакционная коллегия, научная общественность, товарищи по работе благодарят Надежду Матвеевну за плодотворную и необыкновенно нужную деятельность по изучению и пропаганде достижений отечественной науки и техники и желают ей хорошего здоровья, энергии и плодотворной работы на благо нашей Родины.