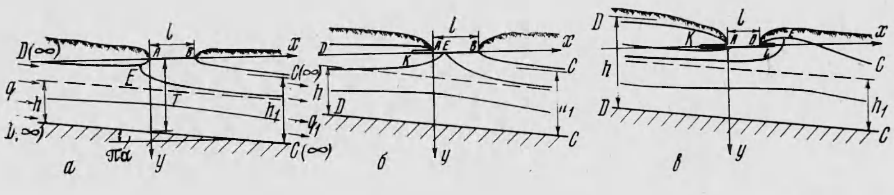
К ЗАДАЧЕ О КАНАЛЕ (ДРЕНЕ) НАД ПОТОКОМ ГРУНТОВЫХ ВОД ПО НАКЛОННОМУ ВОДОУПОРУ

В. Н. Эмих, Е. М. Эмих

(Новосибирск)

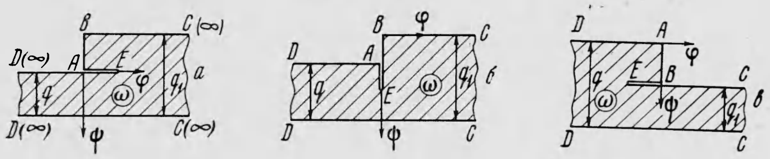
На основе формул, полученных ранее С. Н. Нумеровым [2] для случая установившейся фильтрации в однородном изотропном грунте, выполнены расчеты по программе для ЭВМ М-20, позволяющие сделать некоторые заключения о влиянии физических параметров задачи на фильтрационные характеристики потока.

1. Постановка задачи и вид решения. В естественных условиях верхний горизонт, содержащий грунтовые воды, иногда подстилается наклонным водоупором. Его уклон обусловливает поток грунтовых вод. Известно ([1], гл. X, § 5), что в стационарном состоянии свободная поверхность такого потока в неограниченной области параллельна водоупору. При создании же оросительных каналов или дрен форма потока изменяется: в первом случае в зоне канала возникает подтопление, выражающееся в подъеме свободной поверхности, во втором — в окрестности дрены происходит понижение уровня грунтовых вод по сравнению с естественным состоянием. Ниже эта задача рассматривается главным образом для канала, т. е. применительно к условиям, которые могут возникнуть при орошении.



Фиг. 1. Область фильтрации z

При допущении малости глубины воды в канале (дрене), поперечное сечение которого представляет собой отрезок прямой, С. Н. Нумеров получил [2] методами теории функций решение задачи в виде зависимостей комплексной координаты $z = x + iy$ и приведенного (отнесенного к коэффициенту фильтрации) комплексного потенциала $\omega = \varphi + i\psi$ потока (φ — потенциал скорости, ψ — функция тока) от комплексного параметра $\zeta = \xi + i\eta$, областью изменения которого является полуплоскость. При этом следует различать три возможности, для каждой из которых на фиг. 1—3 схематически изображены области z, ω и ζ.

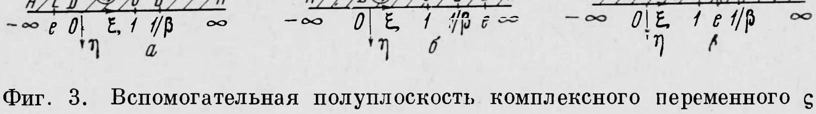


Фиг. 2. Область комплексного потенциала ω

а) Вода фильтруется в грунт из канала по всей его ширине (фиг. 1, *а*); при этом левая ветвь AD свободной поверхности имеет точку минимума E, а линия тока EC разделяет поток грунтовых вод и поток, фильтрующийся из канала. Этот случай возникает при следующем соотношении параметров задачи [1]:

$$h < h_1 \sqrt{1 - \beta} \tag{1.1}$$

где h — глубина потока слева на бесконечности, равная глубине грунтового потока при отсутствии канала; такой поток, следуя С. Н. Нумерову, будем называть естественным; h_1 — глубина потока справа на бесконечности; β — параметр, характеризующий положение точки B на действительной оси плоскости ζ (фиг. 3).



Фиг. 3. Вспомогательная полуплоскость комплексного переменного ζ

б) Фильтрация в грунт происходит через некоторую часть дна канала EB (фиг. 1, *б*), участок же AE дренирует грунтовый поток, причем вдоль отрезка KA, представляющего дренажную щель, грунтовые воды поступают и снизу и сверху. Остальная часть потока, ограниченная сверху линией тока DEC, проходит мимо канала вниз по водоупору, сливаясь с водами, фильтрующимися из канала. Условия, при которых имеет место рассматриваемый случай, таковы:

$$h_1\sqrt{1-\beta}<h<h_1/\sqrt{1-\beta} \tag{1.2}$$

в) Происходит двусторонний приток к каналу, и таким образом, речь идет о дрене (фиг. 1, *в*). В этом случае, возникающем при условии

$$h>h_1/\sqrt{1-\beta} \tag{1.3}$$

правая ветвь BC свободной поверхности имеет точку максимума, а дренажные щели существуют с обеих сторон отрезка AB. Часть потока, ограниченная сверху линией тока DEC, н попадает в дрену.

Решение С. Н. Нумерова охватывает все три перечисленные случая и при выборе координатных систем в соответствии с фиг. 1—3 имеет следующий вид:

$$z=-T\operatorname{ctg}\pi\alpha+q+i\omega-\frac{\cos\pi\alpha}{\pi}\zeta^{\alpha}(\zeta-1)^{1-\alpha}\int_0^1\frac{t^{-\alpha}(1-t)^{\alpha-1}\varphi(t)}{t-\zeta}dt$$

$$\omega=i(q-q_1)+\frac{2}{\pi}q_1\operatorname{ar\,ch}\sqrt{\frac{1-\beta}{\beta(\zeta-1)}}-\frac{2}{\pi}q\operatorname{ar\,ch}\sqrt{\frac{1}{\beta\zeta}} \tag{1.4}$$

$$\varphi(t)=\frac{2}{\pi}q_1\operatorname{ar\,sh}\sqrt{\frac{1-\beta}{\beta(1-t)}}-\frac{2}{\pi}q\operatorname{ar\,ch}\sqrt{\frac{1}{\beta t}}$$

$$q=h\sin\pi\alpha\cos\pi\alpha,\qquad q_1=h_1\sin\pi\alpha\cos\pi\alpha \tag{1.5}$$

Здесь T — глубина водоупора от дна канала под началом координат; $\pi\alpha$ — угол наклона водоупора к горизонтальной плоскости; q и q_1 — величины приведенных расходов потока в его верховой и низовой частях соответственно; эти величины связаны с параметрами h и h_1 соотношениями (1.5).

Среди геометрических характеристик, входящих в решение (1.4), естественно задать в качестве исходных параметры T, α и h (или q). Величина же h_1 и связанный с ней вторым равенством (1.5) параметр q_1 являются искомыми и в свою очередь служат для определения приведенного фильтрационного расхода q_0 из канала на единицу его длины

$$q_0=q_1-q=(h_1-h)\sin\pi\alpha\cos\pi\alpha \tag{1.6}$$

Помимо q_1, неизвестным является и параметр β конформного отображения. Для их определения С. Н. Нумеров предлагает использовать следующие два условия (фиг. 1, 3):

$$z(\infty)=0,\quad z(1/\beta)=l \tag{1.7}$$

Согласно второму равенству (1.3) имеем

$$\omega(\infty)=0,\quad \omega(1/\beta)=i(q-q_1) \tag{1.8}$$

Из первой формулы (1.4) с учетом равенств (1.5), (1.7) и (1.8) получаются следующие соотношения:

$$h-T\frac{1}{\sin^2\pi\alpha}+\frac{2\cos\pi\alpha}{\pi^2}\int_0^1\frac{(1-t)^{\alpha-1}}{t^{\alpha}}f(t)\,dt=0 \tag{1.9}$$

$$\sin\pi\alpha\cos\pi\alpha\left[h_1-T\frac{1}{\sin^2\pi\alpha}+\frac{2\cos\pi\alpha}{\pi^2}(1-\beta)^{1-\alpha}\int_0^1\frac{(1-t)^{\alpha-1}f(t)\,dt}{t^{\alpha}(1-\beta t)}\right]=l \tag{1.10}$$

$$f(t)=h_1\operatorname{ar\,sh}\sqrt{\frac{1-\beta}{\beta(1-t)}}-h\operatorname{ar\,ch}\sqrt{\frac{1}{\beta t}} \tag{1.11}$$

2. Описание вычислений и предварительных преобразований. Разрешим равенство (1.9) относительно h_1:

$$h_1 = \left[\frac{\pi_2}{\cos \pi\alpha}\left(\frac{T}{\sin^2 \pi\alpha} - h\right) + 2h \int_0^1 \frac{(1-t)^{\alpha-1}}{t^\alpha} \operatorname{ar\,ch} \sqrt{\frac{1}{\beta t}}\, dt\right] \times$$

$$\times \left[2 \int_0^1 \frac{(1-t)^{\alpha-1}}{t^\alpha} \operatorname{ar\,sh} \sqrt{\frac{1-\beta}{\beta(1-t)}}\right]^{-1} \qquad (2.1)$$

Внося выражение (2.1) в (1.10), получим уравнение относительно параметра β. Обозначая левую часть этого уравнения через $F(\beta)$, запишем его в виде

$$F(\beta) = l \qquad (2.2)$$

Первым этапом вычислений по программе, составленной авторами для ЭВМ М-20, является определение параметра β из интервала (0,1) как корня уравнения (2.2). Эта процедура осуществляется методом половинного деления ([3], гл. IV, § 3), который применим, если $F(\beta)$ — монотонная функция.

Так как $F(0) = 0$, $F(1) = \infty$, то $F(\beta)$ возрастает с изменением β от нуля до единицы. Вопрос о монотонном характере возрастания β, равносильный вопросу единственности решения уравнения (2.2), не удалось решить непосредственным дифференцированием $F(\beta)$ по β. Тем не менее, используя заключение о строго монотонном возрастании функции $F(\beta)$ в качестве гипотезы, основанной на интуитивных соображениях и результатах вычислений, т. е., принимая неравенство

$$\frac{dF(\beta)}{d\beta} = \frac{dl}{d\beta} > 0 \qquad (2.3)$$

исследуем с физической точки зрения некоторые зависимости, получаемые из вышеприведенных формул.

Продифференцируем по β равенства (1.9) и (1.11)

$$\int_0^1 \frac{(1-t)^{\alpha-1}}{t^\alpha} \frac{\partial f(\beta, t)}{\partial\beta}\, dt = 0 \qquad (2.4)$$

$$\frac{\partial f(\beta, t)}{\partial\beta} = \frac{dh_1}{d\beta} \operatorname{ar\,sh} \sqrt{\frac{1-\beta}{\beta(1-t)}} + \frac{1}{2\beta\sqrt{1-\beta t}}\left(h - \frac{h_1}{\sqrt{1-\beta}}\right) \qquad (2.5)$$

Из (2.4) следует, что в интервале (0,1) функция $\partial f(\beta, t) / \partial\beta$ является знакопеременной. Согласно же (2.5), это возможно только тогда, когда выражения $dh_1 / d\beta$ и $h - h_1 / \sqrt{1-\beta}$ противоположны по знаку; остальные члены правой части (2.5) положительны во всей области $\{(0 < t < 1) \times (0 < \beta < 1)\}$. Считая далее неравенство (2.3) справедливым, имеем

$$\frac{dh_1}{dl} > 0 \quad \text{при } h < \frac{h_1}{\sqrt{1-\beta}}, \qquad \frac{dh_1}{dl} < 0 \quad \text{при } h > \frac{h_1}{\sqrt{1-\beta}} \qquad (2;6)$$

Возвращаясь теперь к неравенствам (1.1) — (1.3), видим, что в случаях а) и б), когда из канала происходит фильтрация в грунт, по крайней мере, через некоторую часть его дна, глубина потока h_1 возрастает с увеличением l, т. е. с расширением фильтрующей части канала. Вторая пара неравенств (2.6), соответствующая случаю в), интерпретируется аналогично: при двустороннем притоке к дрене расширение ее приводит к более интенсивному поглощению ею грунтового потока, что выражается в уменьшении h_1. Однако при некотором l убывание h_1 прекращается (это следует хотя бы из того, что при $l \to \infty$ имеем $\beta \to 1$ и согласно (2.1) $h_1 \to \infty$, и при дальнейшем возрастании l случай в) переходит в случай б).

По ходу вычисления β определяется параметр h_1 и вместе с ним по формуле (1.6) — величина q_0; затем программой предусмотрено вычисление координат точек свободной поверхности потока. Не приводя здесь параметрических уравнений свободной поверхности, которые для правой ее ветви BC $(1 < \zeta < 1 / \beta)$ непосредственно получаются разделением действительной и мнимой частей в первом уравнении (1.4), для левой же ветви AD $(-\infty < \zeta < 0)$ — с предварительным преобразованием правой части этого уравнения при обходе особых точек, отметим один из основных моментов, связанных с приведением исходных формул к виду, пригодному для вычислений на ЭВМ.

Для точек свободной поверхности параметр ζ изменяется вне промежутка [0, 1], и, следовательно, интеграл в правой части первого уравнения (1.4) не является сингулярным, но оказывается несобственным: подынтегральная функция имеет особенности на концах промежутка интегрирования. Поскольку интеграл вычисляется на ЭВМ численно, по формуле Симпсона, эти особенности необходимо изолировать, для чего из промежутка [0, 1] выделяются концевые промежутки [0, ε] и [1 — ε, 1]. В оставшемся промежутке [ε, 1 — ε] интеграл вычисляется на ЭВМ, для промежутков же [0, ε] и [1 — ε, 1] соответствующие интегралы представлены приближенными выражениями, которые затем программируются.

Программа вычислений, так же как и решение С. Н. Нумерова, на котором эта программа основана, пригодна для всех трех случаев, описанных в п. 1. При расчетах основное внимание было уделено случаям, характерным для практики орошения, когда $h < T$, т. е. имеет место один из случаев: а) или б) см. п. 1). Для каждого конкретного случая задаются параметры $l^0 = l / T$, $h^0 = h / T$ и α и в соответствии с этим получаются безразмерные значения геометрических характеристик потока (отнесенных к T) и фильтрационного расхода из канала

$$q_0^0 = q_0 / T = Q_0 / kT$$

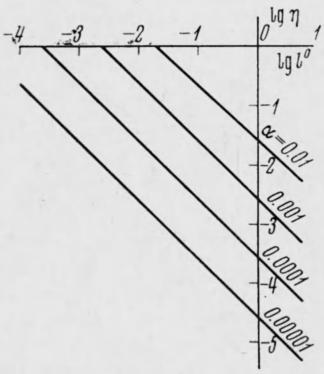
где Q_0 — расход из канала на единицу его длины (*м*^{3} / *сутки* / 1 *п.м.*), k — коэффициент фильтрации грунта (*м* / *сутки*).

3. Анализ результатов вычислений. Целью расчетов является изучение зависимостей величины q_0 фильтрационного расхода из канала и формы свободной поверхности потока от параметров l^0, h^0 и α. Эти зависимости сводятся к следующему.

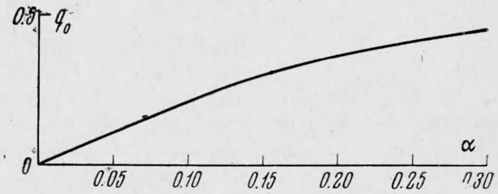
1) Изменение l^0, которое при фиксированном T означает изменение ширины канала l, в условиях подпора весьма слабо отражается на величине фильтрационных характеристик. Иллюстрацией этого служат графики зависимости $\lg \eta$ от $\lg l^0$, построенные на фиг. 4 для $h^0 = 0.2$ и $\alpha = 10^{-2}$, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5} на основании численных данных табл. 1. Величина

$$\eta = \frac{q_0^0}{l^0} = \frac{Q_0}{kl} \qquad (3.1)$$

названа С. Ф. Аверьяновым [4] коэффициентом подпора и представляет отношение фильтрационного расхода Q_0 из канала в рассматриваемом случае к расходу kl при свободной фильтрации.



Фиг. 4. Зависимости $\lg \eta$ от $\ln l^\circ$ для $h^\circ = 0.2$



Фиг. 5. Зависимость q_0^0 от α при $l^\circ = 0.5$ $h^\circ = 0.3$

Приведенные на фиг. 4 зависимости $\lg \eta$ от $\lg l^0$ близки к прямым, угловые коэффициенты которых мало отличаются от минус единицы. Эти графики приближенно представимы уравнениями вида

$$\lg \eta \approx \lg A - (1 - \mu) \lg l^0 = \lg B - (1 - \mu) \lg l \qquad (3.2)$$

где B и μ — постоянные. В отношении постоянной B будет сказано ниже, параметр μ — малая величина порядка $0.0001 \div 0.03$ (тем меньшая, чем меньше α). В частности, для графиков на фиг. 4 значения параметра μ в порядке убывания таковы: 0.023, 0.002, 0.0002, 0.0001.

Потенцируя (3.2), получим

$$\eta \approx Bl^{\mu - 1}$$

или, согласно (3.1)

$$q_0 \approx Bl^{\mu} \qquad (3.3)$$

Равенство (3.3) непосредственно выражает факт слабой зависимости q_0 от l.

2) Зависимость q_0 от параметров h, T и α при малых α ($\alpha < 0.01$) носит линейный характер и может быть представлена приближенным равенством:

$$q_0 \approx \pi\alpha (T - h) \qquad (3.4)$$

Таблица 1

Связь между l°, η и h_1° (h°=0.2)

α	β	$6\cdot10^{-8}$	$24\cdot10^{-4}$	0.0156	0.125	0.354
	l°	$2.513\cdot10^{-5}$	$1.036\cdot10^{-4}$	0.005037	0.04252	0.1389
10^{-5}	η	1.0000	0.2426	0.004989	$5.910\cdot10^{-4}$	$1.810\cdot10^{-4}$
	h_1°	0.999856	0.999926	0.999956	0.999973	0.999985
	l°	$2.509\cdot10^{-4}$	$3.287\cdot10^{-4}$	9.005261	0.04274	0.1391
10^{-4}	η	1.0000	0.7638	0.04774	0.005878	0.001807
	h_1°	0.998567	0.999225	0.999558	0.999735	0.999846
	l°	$2.469\cdot10^{-3}$	$2.566\cdot10^{-3}$	$7.486\cdot10^{-2}$	$4.486\cdot10^{-2}$	0.1410
10^{-3}	η	0.9999	0.9700	0.3339	$5.584\cdot10^{-2}$	$1.778\cdot10^{-2}$
	h_1°	0.985845	0.992319	0.995610	0.997364	0.998464
	l°	0.02130	0,02299	0.02858	$6.540\cdot10^{-2}$	0.1603
10^{-2}	η	0.9999	0.9969	0.8334	0.3720	0.1539
	h_1°	0.878444	0.929881	0.958765	0.975009	0.985513
α	β	0.646	0.875	0.9844	0.99975586	0.999999941
	l°	0.3310	0.6619	1.3239	2.6477	5.2957
10^{-5}	η	$7.594\cdot10^{-5}$	$3.797\cdot10^{-5}$	$1.899\cdot10^{-5}$	$9.496\cdot10^{-6}$	$4.747\cdot10^{-6}$
	h_1°	0.999995	1.000007	1.000028	1.000069	1.000152
	l°	0.3312	0.6621	1.3242	2.6489	5.2998
10^{-4}	η	$7.589\cdot10^{-4}$	$3.796\cdot10^{-4}$	$1.899\cdot10^{-4}$	$9.496\cdot10^{-5}$	$4.571\cdot10^{-5}$
	h_1°	0.999949	1.000071	1.000281	1.000694	1.001526
	l°	0.3330	0.6642	1.3280	2.6599	5.3408
10^{-3}	η	$7.542\cdot10^{-3}$	$3.787\cdot10^{-3}$	$1.899\cdot10^{-3}$	$9.531\cdot10^{-4}$	$4.796\cdot10^{-4}$
	h_1°	0.999498	1.000713	1.002816	1.006966	1.015370
	l°	0.3513	0.6849	1.3654	2.7734	5.7741
10^{-2}	η	$7.109\cdot10^{-2}$	$3.702\cdot10^{-2}$	$1.906\cdot10^{-2}$	$9.874\cdot10^{-3}$	$5.248\cdot10^{-3}$
	h_1°	0.995587	1.007645	1.0289	1.072229	1.165203

Таблица 2

Связь между l°, h_1°, η и величинами x_δ ($\delta = 0.1,\ 0.01,\ 0.001$)

	α	10^{-5}				10^{-4}			
	h°	0.05	0.2	0.5	0.9	0.05	0,2	0.5	0,9
$\beta=6\cdot10^{-8}$	l°	$2.984\cdot10^{-5}$	$2.513\cdot10^{-5}$	$1.571\cdot10^{-5}$	$3.142\cdot10^{-6}$	$2.979\cdot10^{-4}$	$2.509\cdot10^{-4}$	$1.568\cdot10^{-4}$	$3.136\cdot10^{-5}$
	h_1°	0.9998	0.9999	0.9999	1.0000	0.9983	0.9986	0.9991	0.9998
	η	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1,0000
	$\lvert x_{0.1}\rvert$	30672	35544	38597	—	3062,3	3547.8	3843.1	—
	$\lvert x_{0.01}\rvert$	37205	53152	78297	69624	3705.9	5301.6	7804.1	6877.8
	$\lvert x_{0.001}\rvert$	41144	68069	115164	135761	4109.7	6810.6	11526	13665
$\beta=0.999999941$	l°	5.2957	5.2957	5.2957	5.2957	6.2998	5.2998	5.2997	5.2997
	h_1°	1.0002	1.0002	1.0002	1.0002	1.0015	1.0015	1.0015	1.0015
	η	$5.637\cdot10^{-6}$	$4.797\cdot10^{-6}$	$1.967\cdot10^{-6}$	$5.941\cdot10^{-7}$	$5.640\cdot10^{-5}$	$4.751\cdot10^{-5}$	$2.973\cdot10^{-5}$	$6.018\cdot10^{-6}$
	$\lvert x_{0.1}\rvert$	30677	35548	38599	—	3065.9	3572.9	3845.6	—
	$\lvert x_{0.01}\rvert$	37211	53157	78301	69625	3726.0	5331.3	7807.2	6942,6
	$\lvert x_{0.001}\rvert$	41150	68074	115167	135762	4114.8	6822.4	11529	13620
	α	10^{-3}				10−2			
	h°	0.05	0.2	0,5	0.9	0.05	0.2	0.5	0.2
$\beta=6\cdot10^{-8}$	l°	0.002932	0.002469	0.001543	0.0003086	0.02529	0.02130	0.01331	0.002664
	h_1°	0.9832	0.9858	0.9912	0.9082	0.8556	0.8784	0.9240	0.9848
	η	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
	$\lvert x_{0.1}\rvert$	300.98	350.58	378.60	—	26.008	30.751	33.383	—
	$\lvert x_{0.01}\rvert$	366.23	525.81	773.21	683.11	32.334	48.508	73584	65.661
	$\lvert x_{0.001}\rvert$	405.78	674.63	1145.5	1350.9	36.234	63.714	112.30	135.12
$\beta=0.999999941$	l°	5.3411	5.3408	5.3404	5.3397	5.7769	5.7741	5.7685	5.7810
	h_1°	1.0154	1.0154	1.0154	1.0154	1.1653	1.1653	1.1650	1.1648
	η	$5.678\cdot10^{-4}$	$4.796\cdot10^{-4}$	$3.032\cdot10^{-4}$	$6.788\cdot10^{-5}$	0.00606	0.00525	0.00762	0.00144
	$\lvert x_{0.1}\rvert$	306.44	365.91	384.98	—	30.780	36.162	39.416	—
	$\lvert x_{0.01}\rvert$	371.81	779.56	695.98	37.183	37.183	53.353	78.418	74.449
	$\lvert x_{0.001}\rvert$	411.38	681.87	1151.81	1359.8	41.804	68.567	118.24	145.89

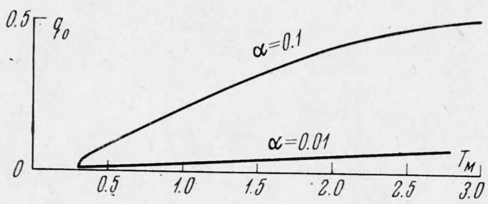
Это обстоятельство отмечено С. Н. Нумеровым [1] и нашло полное подтверждение в результате расчетов. Для иллюстрации соотношения (3.4) приводятся графики зависимости величины q_0 от параметров α (фиг. 5 при $l = 0.5, h = 0.3$, $T = 1$) и T (фиг. 6; при $l = 0.5$, $h = 0.3$). Как видно из фиг. 5, прямолинейный характер зависимости q_0 от α при малых α постепенно нарушается с ростом α. На фиг. 6 при $\alpha = 0.01$ график функции q_0 (T) является почти прямолинейным, в то время как для $\alpha = 0.1$ получается некоторая кривая. Однако значение $\alpha = 0{,}1$ (угол уклона равен 18°) уже выходит за рамки значений α, распространенных в практике.

Сравнивая (1.6) и (3.4), видим, что для малых α выполняется приближенное равенство $h_1 \approx T$, также отмеченное С. Н. Нумеровым [1] и подтвердившееся при вычислениях (табл. 1). Сопоставляя (3.3) и (3.4), получим приближенно

$$q_0 \approx \pi\alpha\ (T - h)l^{\mu} \quad (B = \pi\alpha\ (T - h)) \qquad (3.5)$$

где μ — малая постоянная.

3) Левая и правая ветви свободной поверхности потока имеют асимптоты, параллельные водоупору и отстоящие от него, соответственно, на расстояниях h и h_1 (фиг. 1). При вычислениях обнаруживается, что вниз по потоку уже в непосредственной близости от канала свободная поверхность почти сливается со своей асимптотой, в то время как в верховой части глубина потока превышает естественную глубину даже на значительных расстояниях от канала.



Фиг. 6. Зависимости q_0 от T при $l = 0.5$ *м*, $h = 0.3$ *м*

По ходу вычисления координат левой ветви свободной поверхности определялись значения x_δ координаты x, начиная с которой $\Delta y < \delta$, где Δy — расстояние по вертикали между свободной поверхностью и ее асимптотой. Абсолютные величины этих значений (в силу выбора системы координат $x_\delta < 0$) приведены в табл. 2 для $\delta = 0.1$, 0.01 и 0.001 (линейные характеристики отнесены к T).

Величина Δy может служить мерой подтопления, в то время как x_δ, выражает дальность подтопления. Последнее понятие столь же условно, как и понятие радиуса влияния скважины в случае неограниченных размеров воронки депрессии. При изменении l величина x_δ меняется чрезвычайно слабо (особенно при малых α), поэтому в таблице для каждого из рассматриваемых значений α и h^0 приводятся только наименьшие и наибольшие значения $|x_\delta|$; первые отвечают минимальному значению параметра β из тех, для которых производились вычисления ($\beta \approx 6 \cdot 10^{-8}$); для вторых β максимально ($\beta \approx 1 - 6 \cdot 10^{-8}$). Так как при $h^0 = 0.9$ величина $\delta = 0.1$ равна глубине естественного потока и не может служить характеристикой подтопления, в соответствующих графах табл. 2 отсутствуют значения $|x_{0.1}|$. Для остальных же значений h^0, фигурирующих в таблице, координата $|x_{0.1}|$ имеет порядок величины $(\pi\alpha)^{-1}$, определяющей расстояние точки пересечения водоупора с горизонтальной осью координат от канала.

4) В случае $h = 0$ расчетные формулы непосредственно получаются из уравнений для общего случая, если положить в них $q = 0$. Проведенные расчеты подтверждают приближенные соотношения, предложенные С. Н. Нумеровым для координат L и H точки выхода свободной поверхности на водоупор в верховой части потока

$$L \approx -T \operatorname{ctg} \pi\alpha, \quad H \approx 0$$

Эти равенства указывают на то, что в рассматриваемом случае зона подтопления простирается до пересечения водоупора с горизонтальной осью координат, причем свободная поверхность в зоне подтопления является почти горизонтальной, а фильтрация практически отсутствует.

Поступила 19 IX 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М. Гостехиздат, 1952.
2. Нумеров С. Н. О фильтрации к горизонтальной дрене в случае наклонного водоупора. Л.— М., Изв. Всес. Научн.-исслед. ин-та гидротехн. им. Б. Е. Веденеева, 1951, т. 46.
3. Демидович Б. П., Марон И. Л. Основы вычислительной математики. М., Физматгиз, 1960.
4. Костяков А. Н., Фаворин Н. Н., Аверьянов С. Ф. Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М., Изд-во АН СССР, 1956.