

О РАСЧЕТЕ ВОДОПОНИЗИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОТЛОВАНА УДЛИНЕННОЙ ФОРМЫ

Доц. В. И. Давидович, научн. сотр. Н. Г. Паукер

Широкое применение способа искусственного понижения уровня подземных вод при устройстве оснований для гидротехнических и промышленных сооружений, а также крупных высотных зданий вызвало необходимость разработки методики расчета водопритока к котлованам в различных гидрогеологических условиях.

В настоящей статье разбирается случай притока воды к водопонижительной установке котлована, вытянутой в плане формы, в условиях напорно-безнапорного режима вскрываемых котлованом водоносных горизонтов. Внимание к этому случаю было привлечено строительством шлюза на судоходном канале. Несмотря на специальный характер, поставленная задача имеет и теоретический интерес, поскольку позволяет в конкретных гидрогеологических условиях проверить пригодность тех или иных расчетных схем и формул.

Котлован упомянутого сооружения в настоящее время уже осуществлен, и тот прогноз возможного понижения уровня подземных вод, который был дан в 1952 г. при проектировании сооружения на основании приведенных ниже расчетов, в основном подтвердился.

1. Исходные данные

Гидрогеологические условия объекта строительства сводятся к следующему (рис. 1). С поверхности до глубины 5—12 м залегают четвертичные отложения, представленные глинами, различными суглинками, супесями и песками с примесью гравия, гальки, иногда с валунами. В нижней части четвертичной толщи к флювиогляциальным слоистым пескам приурочен первый водоносный горизонт с небольшим местным напором. Водопроницаемость встречающихся прослоек грубозернистых песков характеризуется величиной коэффициента фильтрации порядка 13 м/сутки. Под четвертичными залегают коренные породы палеозойского возраста, сверху представленные песчано-глинистыми отложениями, по составу близкими к суглинкам, с линзами супесей и песков. Ниже залегает мощный слой мелкозернистых песков с линзами рыхлых песчаников. К этим пескам приурочен второй основной водоносный горизонт с напорными водами. Подстилается он плотными глинами. Мощность водоносного горизонта в среднем 34 м, полный напор 43 м, средний коэф-

фициент фильтрации $1,8 \text{ м/сутки}$. Верхний водоупор основного водоносного горизонта не является достаточно выдержанным: в некоторых местах отмечается соединение обоих водоносных горизонтов. Вследствие этого все проницаемые водонасыщенные породы можно рассматривать как один обводненный комплекс — единый сложный водоносный горизонт ненапорных вод. Если же слабопроницаемые песчано-глинистые породы, разделяющие четвертичные и коренные пески, считать за относительный водоупор, то основной пласт мелкозернистых песков следует рассматривать как напорный водоносный горизонт со средней отметкой пьезометрического уровня 66 м .¹

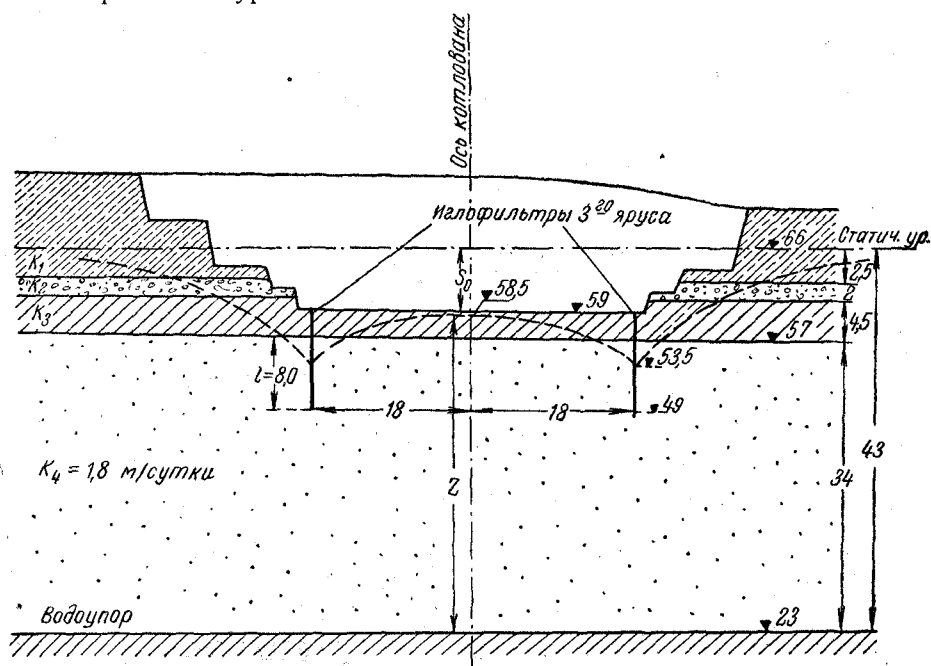


Рис. 1. Схематический гидрогеологический разрез в центральной части котлована

Отрывка котлована шлюза проектировалась под защитой многоярусной иглофильтровой установки, в задачу которой входило снижение уровня подземных вод на участках верхней и нижней голов шлюза до отметок 54 и 56. В средней части котлована достаточно было снизить уровень только до отметки 59. Так как общая величина понижения должна быть не менее $7,5\text{—}12 \text{ м}$, а один ярус иглофильтров способен снизить уровень только на $4,5\text{—}5 \text{ м}$, то необходимо было запроектировать по крайней мере трехъярусную иглофильтровую водопонижительную установку.² Предполагалось использовать стандартные передвижные иглофильтровые установки (ПВУ), каждая из которых состоит из 100 иглофильтров с максимальной производительностью $350 \text{ м}^3/\text{час}$.

Расстояние между иглофильтрами было запроектировано стандартное — $1,2 \text{ м}$. Однако при недостаточной эффективности их работы число иглофильтров можно удвоить, тогда расстояние между ними соответственно уменьшится до $0,6 \text{ м}$. Радиус фильтра вместе с гравийной засыпкой $0,05 \text{ м}$. Номинальная производительность одного фильтра

¹ Отметки даны от условно выбранной плоскости сравнения.

² В то время глубокие (эжекторные) иглофильтры для одноярусного понижения испытывались еще только в экспериментальном порядке.

3—3,5 м³/час, однако фактический расход при работе всей установки, как известно, зависит от условий притока воды и взаимодействия иглофильтров. Поэтому заранее расход одного фильтра был неизвестен.

Предметом исследования явилось выяснение условий, при которых проектируемая многоярусная установка могла бы справиться с поставленной задачей — обеспечить нормальную работу по выемке котлована для упомянутого выше шлюза. С этой целью произведен аналитический расчет всей установки и выполнено опытное определение остаточного напора по методу ЭГДА.

Основным расчетным элементом водопонижительной установки является величина остаточного напора по продольной оси котлована или отметка z — наивысшей точки депрессионной поверхности между двумя рядами иглофильтров (рис. 1). Если эта отметка обеспечивает устойчивость основания котлована, то водопонижительная установка выполнит

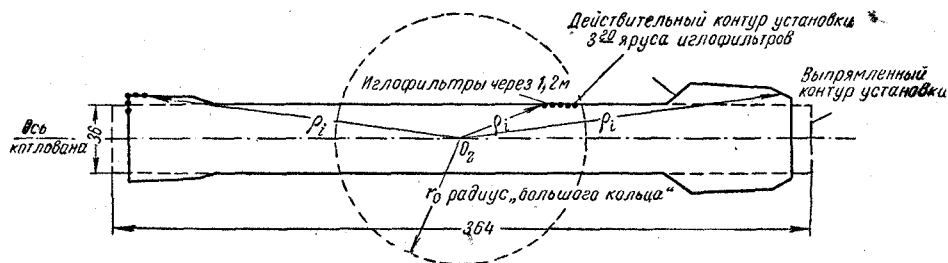


Рис. 2. Контур водопонижительной установки

поставленную перед ней задачу. Если указанное условие не будет выдержано, то необходимо задать дополнительное количество иглофильтров для дальнейшего снижения кривой депрессии.

С точки зрения надежности запроектированной установки наибольший интерес представляет положение депрессионной поверхности при вводе в действие третьего нижнего яруса водопонижения, так как в этом случае следует ожидать наибольшей выпуклости депрессионной кривой между двумя рядами иглофильтров. Следовательно, при таком условии наибольшее значение остаточного напора будет в наименее благоприятном участке — оси котлована. Поэтому для аналитического расчета величины остаточного напора достаточно ограничиться рассмотрением именно этого случая.

При установлении расчетной схемы водопритока контур установки в плане принят прямоугольным (рис. 2) со сторонами 36 (расстояние между двумя рядами иглофильтров третьего яруса) и 364 м. Полный периметр установки составляет 800 м. Иглофильтры расположены равномерно через 1,2 м по всему контуру. Следовательно, на этом протяжении может быть расположено $800 : 1,2 = 666$ иглофильтров.

2. Расчетная схема и определение притока к водопонижительной установке

Как видно из рис. 1, иглофильтры третьего (нижнего) яруса закладываются на отметке 59. Длина каждого иглофильтра 10 м, следовательно, все они доводятся лишь до отметки 49, а отметка нижнего водопора — 23. Таким образом, расчетную схему водопритока следует принять с учетом взаимодействия несовершенных выработок, причем либо в условиях напорного, либо безнапорного режима подземных вод.

Такой схемой в настоящее время является схема расчета иглофильтровой установки, предложенная П. П. Аргуновым [5], по которой установка прямоугольной или близкой к ней формы приводится к круговой равновеликой ей по площади. Однако, по мнению П. П. Аргунова, сведение к круговой системе расположения фильтров возможно, если контур действительного расположения фильтров имеет прямоугольную форму при отношении сторон не свыше 1 : 1,5. В нашем случае это соотношение равно 1 : 10, и, следовательно, указанное условие не может быть соблюдено. Действительно, если подсчитать расход всей установки по упрощенной схеме П. П. Аргунова, то получится величина, как указано ниже, явно заниженная.

Непригодна также и формула для расчета общего притока к вытянутой или контурной установке, приводимая в инструкции к пользованию иглофильтровой установкой [12], поскольку в этой формуле для несовершенных выработок глубина вскрытой части водоносного горизонта принимается за всю мощность последнего, что приводит к грубым ошибкам.

Поэтому расчет водопритока производился несколькими способами, учитывающими «несовершенство» выработок, причем, имея в виду характер верхнего водоносного горизонта, расчет вели как в условиях напорного, так и безнапорного режима, а затем сравнением полученных результатов выбирали наиболее надежное для последующего определения z . Определение z — величины наиболее важной — произведено по видоизмененной формуле П. П. Аргунова, учитывающей любое расположение дренажных выработок, при любом соотношении вскрытой части водоносного горизонта и различных расходах отдельных водопонижающих скважин или иглофильтров.¹

Известно, что по условиям работы на всасывание иглофильтры могут практически понизить уровень воды относительно отметки их заложения не более чем на 5—6 м. В рассматриваемом случае для третьего яруса установки понижение у внешней поверхности иглофильтров водоприемной части может быть осуществлено до отметки 53—54. Предположим, работает только один иглофильтр с максимальной производительностью 3—3,5 м³/час. Тогда возможное понижение, создаваемое одним иглофильтром, может быть определено по следующей формуле П. П. Аргунова для одиночной несовершенной выработки [5]:

$$s = \frac{q}{2\pi K} \left[\frac{M-l}{l} \left(\operatorname{arsh} \frac{l}{r} - \operatorname{arsh} \frac{l}{R} \right) + \ln \frac{R}{r} \right], \quad (1)$$

где q — расход, в нашем случае в среднем принимаем равным 3,3 м³/час;

K — коэффициент фильтрации песка напорного горизонта — 1,8 м/сутки или 0,075 м/час;

M — мощность напорного горизонта — 34 м;

l — вскрытая часть напорного горизонта, в данном случае (рис. 1) равная 57 — 49 = 8 м;

r — радиус фильтра (с гравийной засыпкой) — 0,05 м;

R — радиус влияния (по опытным данным) для мелкозернистого песка данного горизонта, принимаемый для одиночной выработки равным примерно 120 м.

¹ Это видоизменение формулы П. П. Аргунова произведено научным сотрудником Н. Г. Паукером. См. статью в настоящем сборнике «О расчете коэффициента фильтрации, радиуса влияния и понижения пьезометрического уровня по данным групповой откачки из несовершенных скважин».

Подставив соответствующие значения в формулу (1), получим:

$$s = \frac{3,3}{6,28 \cdot 0,075 \cdot 34} \left[\frac{34-8}{8} \left(\operatorname{arsh} \frac{8}{0,05} - \operatorname{arsh} \frac{8}{120} \right) + 2,3 \lg \frac{120}{0,05} \right] = 5,5 \text{ м.}$$

Тогда отметку динамического уровня у иглофильтра $59 - 5,5 = 53,5$ принимаем для последующих расчетов.

При взаимодействии 666 иглофильтров дебит каждого из них будет, конечно, значительно меньше дебита одиночного фильтра, но динамический уровень сохранится приблизительно тот же.

Определим общий приток ко всей водопонижительной установке при работе третьего яруса иглофильтров. Понижение по оси котлована должно быть не менее 7,5 м (чтобы избежать смачивания дна котлована и предотвратить выпор грунта).

Расчет производим следующими способами:

- 1) по формуле И. Козени для несовершенного «большого колодца» в условиях безнапорного водоносного горизонта;
- 2) то же, в условиях напорного горизонта;
- 3) по схеме расчета кольцевого дренажа из несовершенных скважин в безнапорном горизонте;
- 4) то же, для напорного горизонта;
- 5) по формуле для двух параллельных дрен несовершенного типа в безнапорном горизонте.

Приведение действительной конфигурации установки к круговому контуру «большого колодца» производится путем введения радиуса r_0 круга, площадь которого F эквивалентна площади, ограниченной иглофильтрами третьего яруса, т. е.

$$r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}} = \frac{13100}{3,14} = 65 \text{ м.}$$

Эта величина и принимается соответственно в дальнейших расчетах.

1. Формула И. Козени для ненапорных вод [3]

$$Q = 1,366 \frac{K(l_1^2 - l_2^2)}{\lg \frac{R}{r_0}} \left[1 + 7 \sqrt{\frac{r_0}{2l_1}} \cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{l_1}{H} \right) \right]. \quad (2)$$

Обозначение входящих в нее величин показано на рис. 3, откуда видно, что вскрытая часть водоносного горизонта $l_1 = 66 - 49 = 17 \text{ м}$; $l_2 = l_1 - s_0 = 17 - 7,5 = 9,5 \text{ м}$; r_0 — радиус приведенного контура установки — 65 м.

Неизвестной является величина R — радиус депрессионной воронки всей установки. Для определения его обычно пользуются формулой И. П. Кусакина. Однако при значительных величинах r_0 она непригодна. Поэтому воспользуемся новой полуэмпирической формулой, предложенной Е. Е. Керкисом [8], аналогичной формуле И. П. Кусакина, но учитывающей приведенный радиус установки и более правильно отражающей зависимость R от понижения s_0 ,

$$R = \sqrt{r_0^2 + cKHs_0}. \quad (3)$$

В этой формуле, кроме известных уже обозначений, имеется коэффициент c , зависящий от r_0 и от продолжительности работы водопонижительной установки. По данным Е. Е. Керкиса [8], коэффициент c в среднем может быть принят равным 200.

Подставив соответствующие величины в формулу (3), получим

$$R = \sqrt{65^2 + 200 \cdot 1,3 \cdot 43 \cdot 7,5} = 297 \text{ м.}$$

Такого же порядка получается величина среднего расстояния от центра приведенного контура установки до берега реки в условиях данного участка. Поэтому в дальнейшем радиус депрессии установки (от ее центра) примем равным 300 м.

Средний коэффициент фильтрации для всего комплекса пород, принимаемых за единый безнапорный водоносный горизонт, можно вычис-

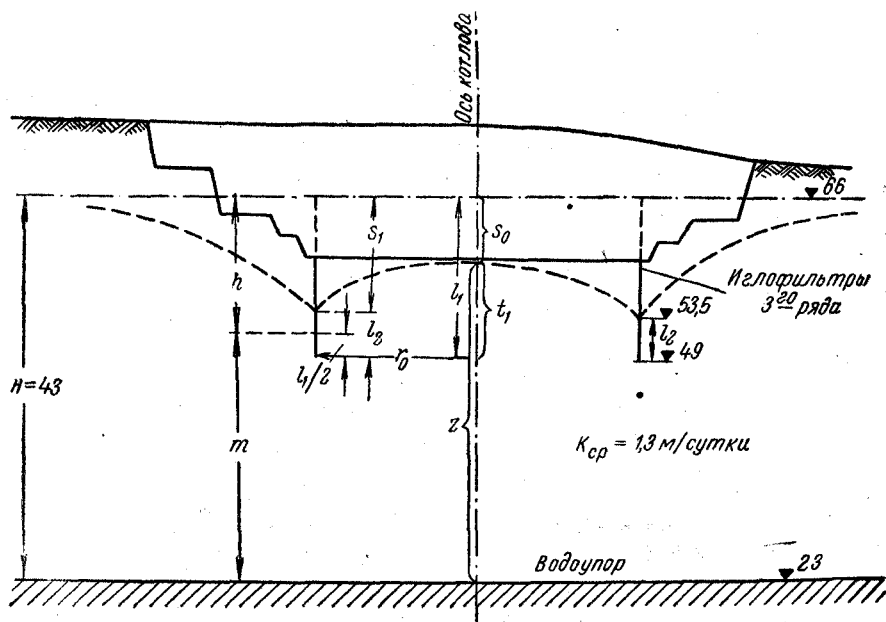


Рис. 3. Расчетная схема для третьего яруса иглофильтров

лить по зависимости, предложенной Г. Н. Каменским [7]. При этом необходимо учесть, что движение воды из верхних слоев при установившейся депрессионной воронке (см. рис. 1) будет происходить как в горизонтальном, так и в вертикальном (вниз) направлениях. Поэтому K_{cp} примем приблизительно как величину среднюю из K' и K''

$$K' = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{\frac{h_1}{K_1} + \frac{h_2}{K_2} + \frac{h_3}{K_3} + \frac{h_4}{K_4}} = \frac{2,5 + 2 + 4,5 + 34}{\frac{2,5}{0,11} + \frac{2}{13} + \frac{4,5}{0,12} + \frac{34}{18}} = 0,54 \text{ м/сутки};$$

$$K'' = \frac{2,5 \cdot 0,11 + 2 \cdot 13 + 4,5 \cdot 0,12 + 34 \cdot 18}{2,5 + 2 + 4,5 + 34} = 2,05 \text{ м/сутки};$$

$$K_{cp} = \frac{0,54 + 2,05}{2} = 1,3 \text{ м/сутки.}$$

Подставим полученные значения K_{cp} , R и r_0 в формулу (2)

$$Q = 1,366 \frac{1,3 (17^2 - 9,5^2)}{\lg \frac{300}{65}} \left[1 + 7 \sqrt{\frac{65}{2 \cdot 17}} \cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{17}{43} \right) \right] =$$

$$= 472 \text{ м}^3/\text{сутки или } 197 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Тогда дебит одного иглофильтра составит

$$197 : 666 = 0,3 \text{ м}^3/\text{час.}$$

2. Формула И. Козени¹ для напорных вод

$$Q = 2,73 \frac{K l s_0}{\lg \frac{R}{r_0}} \left[1 + 4,95 \sqrt{\frac{r_0}{l}} \cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{l}{M} \right) \right], \quad (4)$$

где в соответствии с рис. 1

M — мощность напорного горизонта — 34 м;

K — коэффициент фильтрации — 1,8 м/сутки;

s_0 — понижение в центре установки, равное, как и в предыдущем случае, 7,5 м;

l — вскрытая мощность напорного горизонта:

$$l = 57 - 49 = 8 \text{ м.}$$

Остальные обозначения прежние.

Подставляя соответствующие величины в формулу (4), получим

$$Q = 2,73 \frac{1,8 \cdot 8 \cdot 7,5}{\lg \frac{300}{65}} \left[1 + 4,95 \sqrt{\frac{65}{8}} \cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{8}{34} \right) \right] =$$

$$= 6215 \text{ м}^3/\text{сутки или } 259 \text{ м}^3/\text{час},$$

откуда дебит одного иглофильтра $259 : 666 = 0,39 \text{ м}^3/\text{час}$.

3. Расчет дебита кольцевого дренажа произведен по приближенной формуле С. К. Абрамова [1]. По этой схеме расчета весь водоносный пласт разделяется на безнапорную и напорную зоны с использованием для последней формулы М. Маскета.

Для одной взаимодействующей выработки (иглофильтра) формула имеет следующий вид

$$q = \pi K s_1 \left[\frac{2h - s_1}{\lambda - n - 1} + \frac{2m\beta}{(1 + \beta)N} \right], \quad (5)$$

$$\left[\ln \frac{R^n}{r_0^{n-1} r} - \sum_{\lambda=1}^n \ln 2 \sin \frac{\pi \lambda}{n} \right],$$

где, исходя из рис. 3,

s_1 — общее понижение уровня воды у иглофильтров третьего яруса, в этом случае $s_1 = 66 - 53,5 = 12,5 \text{ м}$;

$$h = s_1 + \frac{l_2}{2} = 12,5 + \frac{4,5}{2} = 14,75 \text{ м}$$

(l_2 — длина водоприемной части фильтра,

$$l_2 = 53,5 - 49 = 4,5 \text{ м});$$

¹ В этом виде формула И. Козени приведена с исправлением опечатки, которая допущена в подлиннике [15]. Исправление опечатки, помещенное в одном из последующих номеров этого журнала [16], прошло, видимо, незамеченным нашими исследователями и в ряде работ, например [3, 6, 9, 14], формула И. Козени приводится в неправильном виде.

R — радиус депрессии при работе установки или среднее расстояние от ее центра до реки, как и прежде, равное 300 м;

r_0 — приведенный радиус установки 65 м;

r — радиус водоприемной части фильтра, равный примерно 0,05 м;

$$m = H - h = 43 - 14,75 = 28,25 \text{ м};$$

n — число иглофильтров в установке — 666;

λ — число членов суммы от 1 до $n-1$, т. е. от 1 до 665;

$$\beta = \frac{N}{\xi_0},$$

где

$$\xi_0 = \frac{1}{2h} \left\{ 2 \ln \frac{4m}{r} - \ln \left[\frac{\Gamma(0,875\bar{h}) \Gamma(0,125\bar{h})}{\Gamma(1-0,875\bar{h}) \Gamma(1-0,125\bar{h})} \right] \right\} - 1,38;$$

$$N = \ln \left(\frac{R^n}{r_0^{n-1}m} \right) - \sum_{\lambda=1}^{\lambda=n-1} \ln 2 \sin \frac{\pi\lambda}{n};$$

$$\bar{h} = \frac{l_2}{2m} = \frac{4,5}{2 \cdot 28,25} = 0,08.$$

Величина $\ln \left[\frac{\Gamma(0,875\bar{h}) \Gamma(0,125\bar{h})}{\Gamma(1-0,875\bar{h}) \Gamma(1-0,125\bar{h})} \right]$ определяется по вспомогательному графику И. А. Чарного [13]; для $\bar{h} = 0,08$ эта величина равна 7,2. Тогда

$$\xi_0 = \frac{1}{0,16} \left(4,6 \lg \frac{4 \cdot 28,25}{0,05} - 7,2 \right) - 1,38 = 51,38 - 1,38 \approx 50;$$

$$N = 2,3 \lg \frac{300^{666}}{65^{665} \cdot 28,25} - \sum_1^{665} \ln 2 \sin \frac{\pi\lambda}{666} = 1015 - 6 = 1009;$$

$$\beta = \frac{1009}{50} = 20,2.$$

Подставим полученные величины в формулу (5), тогда

$$q = 3,14 \cdot 1,3 \cdot 12,5 \left[\frac{2 \cdot 14,75 - 12,5}{1022 - 6} + \frac{2 \cdot 28,25 \cdot 20,2}{(20,2 + 1) 1009} \right] =$$

$$= 3,6 \text{ м}^3/\text{сутки} \text{ или } 0,15 \text{ м}^3/\text{час}.$$

4. Дебит одной из взаимодействующих выработок контурной водопонижительной установки может быть определен по видоизмененной С. К. Абрамовым формуле М. Маскета [10], использованной также И. А. Чарным при расчете взаимодействия несовершенных скважин в напорном горизонте [13]:

$$q = \frac{2\pi KMs_1}{N} \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad (6)$$

где $M = 34 \text{ м}$ (рис. 1);

$K = 1,8 \text{ м/сутки}$;

s_1 — понижение уровня в иглофильтрах, как и в предыдущем случае, равное 12,5 м.

Величины β и ξ_0 определяются так же, как указано выше;

$$\bar{h} = \frac{l}{M} - \text{относительное погружение иглофильтра в напорный горизонт,}$$

$$\bar{h} = \frac{8}{34} = 0,235.$$

Таким образом,

$$\xi_0 = \frac{1}{2 \cdot 0,235} \left(4,6 \lg \frac{4 \cdot 34}{0,05} - 4,8 \right) - 1,38 = 23,4 - 1,38 \cong 22.$$

Величина N может быть определена по формуле С. К. Абрамова [2].

$$N = \ln \left(\frac{R^n}{r^{n-1} M} \right) - \sum_{\lambda=1}^{\lambda=n-1} \ln 2 \sin \frac{\pi \lambda}{n}. \quad (7)$$

Подставив в нее соответствующие значения, найдем

$$N = \ln \left(\frac{300^{666}}{65^{666} \cdot 34} \right) - \sum_1^{665} \ln 2 \sin \frac{3,14 \lambda}{666} = 1012 - 6 = 1006;$$

$$\beta = \frac{N}{\xi_0} = \frac{1006}{22} = 45,7;$$

$$q = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,8 \cdot 34 \cdot 12,5}{1006} \frac{45,7}{46,7} = 4,67 \text{ м}^3/\text{сутки или } 0,2 \text{ м}^3/\text{час}.$$

5. Расчет по схеме притока к двум дренам. Для определения притока воды в иглофильтр рассмотрим схему, соответствующую которой продольные ряды иглофильтров могут быть заменены двумя параллельными рядами дрен (рис. 4). Здесь допускаем, во-первых, что водопоглощение в период откачки производится в точке — дрене, в то время как фактически величина рабочей части иглофильтра составляет в условиях работы третьего яруса $53,5 - 49,0 = 4,5$ м. Во-вторых, эта схема предполагает полное водопоглощение по всей длине дрены; фактически же, поскольку иглофильтры располагаются на расстоянии 1,2 м друг от друга, какая-то часть расхода, повидимому, пройдет между иглофильтрами.

Так как, с одной стороны, длина рабочей части иглофильтра 4,5 м составляет сравнительно небольшую долю от мощности водоносного пласта — 34 м и, с другой стороны, близкое расположение соседних иглофильтров в значительной мере ограничивает возможность фильтрации между ними сколько-нибудь заметного расхода, можно полагать, что намечаемая расчетная схема притока приближенно даст возможность определить приток в иглофильтр.

Для расчета пользуемся методом С. Н. Нумерова [11], по которому приток на 1 пог. м длины дрены

$$q = K q_r, \quad (8)$$

где q_r — приведенный фильтрационный расход, определяемый из уравнения

$$\frac{x}{T} = \frac{1}{q_r} y \left(1 - 0,5 \frac{y}{T} \right) + \frac{T}{q_r} f \left(\frac{L}{T}, \frac{q_r}{T} \right), \quad (9)$$

где, в свою очередь, x и y — координаты какой-либо точки левой ветви кривой, принимаемой симметричной правой;

L и T ясны из рис. 4.

Функция $f\left(\frac{L}{T}, \frac{q_r}{T}\right)$ берется по специальному графику [11].

Принимаем значения x и y соответствующими границе распространения зоны влияния котлована на некоторый момент откачки. При этом величина y соответствует понижению уровня грунтовых вод до отметки дрены, т. е. $y = -(66 - 53,5) = -12,5$ м.¹

Величина же x может быть установлена по формуле К. Э. Лембке [9]

$$x = \sqrt{\frac{3KtH}{\beta}}, \quad (10)$$

где $K = 1,8$ м/сутки;

$t = 90$ суток — расчетный период откачки;

$H = y = 12,5$ м (абсолютное значение) — упомянутое выше понижение первоначального уровня грунтовых вод;

$\beta \approx 0,4$ — водоотдача.

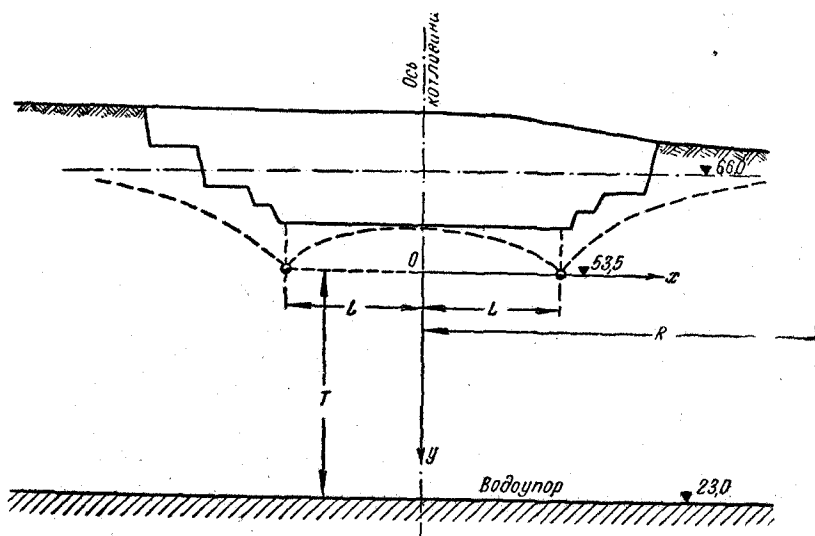


Рис. 4. Расчетная схема для двух дрен

Учитывая направление координатных осей на рис. 4 после подстановки этих данных в формулу (10), найдем $x \approx -120$ м.

Замечаем, что $T = 30,5$ м, $L = 18$ м.

Подставляя указанные величины в выражение (9) и решая его относительно q_r подбором, находим, что $q_r = 3,2$. Следовательно, по (8) $q = 1,8 \cdot 3,2 = 5,75$ м³/сутки на 1 пог. м длины дрены. Имея в виду, что один иглофильтр приходится на 1,2 м соответствующей ему длины дрены, найдем окончательно, что приток в один иглофильтр

$$q = 5,75 \cdot 1,2 = 6,9 \text{ м}^3/\text{сутки} = 0,29 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Таким образом, по пяти различным способам расчета мы получим величину дебита одного иглофильтра от 0,15 до 0,39 м³/час. Более высокие значения q отвечают расчету по способу «большого колодца» и более низкие — по способу кольцевого дренажа; значение q , полученное по способу парных дрен, занимает среднее положение.

¹ Следует обратить внимание на направление координатных осей на рис. 4.

Если же рассчитать q по способу П. П. Аргунова [5]

$$q = \frac{2\pi KMs_0}{n \left[\frac{M-l}{l} \left(\operatorname{arsh} \frac{l}{r_0} - \operatorname{arsh} \frac{l}{R} \right) + \ln \frac{R}{r_0} \right]}, \quad (11)$$

то получим $q = 0,098 \text{ м}^3/\text{час}$, т. е. величину явно заниженную по сравнению с предыдущими результатами. Ввиду этого для дальнейших расчетов z примем значение q в среднем равным $0,27 \text{ м}^3/\text{час}$. Полученная величина в 12 раз меньше дебита одиночного иглофильтра. Следовательно, коэффициент взаимодействия всей системы иглофильтров составит около 0,08.

Если, приняв $q = 0,27 \text{ м}^3/\text{час}$, определить z по упрощенной схеме П. П. Аргунова, то понижение в центре установки окажется ниже отметки динамического уровня у иглофильтров, что, конечно, нереально. Поэтому расчет z ведется по видоизмененной формуле П. П. Аргунова для действительного контура водопонижительной установки.

3. Установление отметки пьезометрического уровня в центре котлована

Действительный контур водопонижительной установки третьего яруса иглофильтров показан на рис. 2.

1. Видоизмененная формула Аргунова для напорных вод.

$$z = H - \frac{Q \lg R + 0,434 \sum_1^n q_i \frac{M-l_i}{l_i} \left(\operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i(z)}} - \operatorname{arsh} \frac{l_i}{R} \right) - \sum_1^n q_i \lg \rho_{i(z)}}{2,73KM}, \quad (12)$$

где z — отметка пьезометрического уровня в каком-либо пункте депрессионной воронки;

H — отметка первоначального пьезометрического уровня на участке водопонижения (до начала откачки);

Q — суммарный расход всех n водопонижающих выработок (иглофильтров) при их совместной работе:

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \sum q_i;$$

R — радиус депрессии всей установки;

q_i — дебит одной какой-либо из взаимодействующих выработок;

M — средняя мощность напорного водоносного горизонта;

l_i — вскрытая часть напорного горизонта в той или иной выработке;

K — среднее значение коэффициента фильтрации для всего участка водопонижения;

ρ_i — расстояние от выбранной точки, где определяется z , до какой-либо из водопонижающих выработок; при определении z необходимо знать расстояния до каждой из этих выработок.

В данном случае $q_1 = q_2 = \dots = q_n = q$ и $l_1 = l_2 = \dots = l_n = l$. Следовательно, формулу (12) можно упростить:

$$z = H - \frac{Q \lg R + 0,434q \frac{M-l}{l} \left(\sum_1^n \operatorname{arsh} \frac{l}{\rho_i} - n \operatorname{arsh} \frac{l}{R} \right) - q \sum_1^n \lg \rho_i}{2,73KM}. \quad (13)$$

Точка z выбрана в центральной части по оси котлована. В этом случае расстояния ρ_i симметричны относительно оси котлована, что несколько упрощает расчеты. Кроме того, кратчайшее расстояние от точки O_z до ближайших иглофильтров будет 18 м, а при соотношении $\rho_i > 2,5l$ вполне допустимо считать $\operatorname{arsh} \frac{l}{\rho} \approx \frac{l}{\rho}$. Тогда формула (12) еще более упростится

$$z = H - q \frac{n \lg R - \sum_1^n \lg \rho_i + 0,434 (M - l) \left(\sum_1^n \rho_i^{-1} - \frac{n}{R} \right)}{2,73KM}. \quad (14)$$

Подставив соответствующие значения, получим

$$z = 66 - 0,27 \cdot 24 \frac{666 \lg 300 - \sum_1^{666} \lg \rho_i + 0,434 (34 - 8) \left(\sum_1^{666} \rho_i^{-1} - \frac{666}{300} \right)}{2,73 \cdot 1,8 \cdot 34} = 54,3.$$

Следовательно, понижение в точке O_z будет $66 - 54,3 = 11,7$ м.

2. Видоизмененная формула Аргунова для безнапорных вод

$$H^2 - z^2 = \frac{1}{\pi K} \left[Q \left(\ln R - \frac{z}{R} \right) - \sum_1^n q_i \ln \rho_i + \sum_1^n q_i \frac{H - l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_i} + \sum_1^n \frac{q_i l_i}{R} \right]. \quad (15)$$

Как и в предыдущем случае, учитывая, что $q_i = q$ и $l_i = l$, формула упрощается

$$H^2 - z^2 = \frac{q}{\pi K} \left[n \left(\ln R - \frac{z}{R} \right) - \sum_1^n \ln \rho_i + (H - l_2) \sum_1^n \rho_i^{-1} + \frac{n l_2}{R} \right]. \quad (16)$$

Однако в таком виде формула неудобна для вычисления z , так как величину ее необходимо находить способом подбора. Поэтому представим формулу (16) в виде квадратного уравнения

$$z^2 - \frac{Q}{\pi K R} z - \left\{ H^2 - \frac{q}{\pi K} \left[n \ln R - \sum_1^n \ln \rho_i + (H - l_2) \sum_1^n \rho_i^{-1} + \frac{n l_2}{R} \right] \right\} = 0. \quad (17)$$

Решая его относительно z , получим $z = 55,1$.

Следовательно, понижение в точке O_z будет $66 - 55,1 = 10,9$.

Обе полученные величины z (по схеме напорного и безнапорного горизонтов) близки между собой и в целом удовлетворяют задаче, поставленной перед водопонизительной установкой.

4. Опыты по методу ЭГДА

Опыты по методу ЭГДА производились в лаборатории гидрогеологии Ленинградского горного института.

Было выполнено два исследования по схемам соответственно отвечающим условиям, представленным на рис. 1 и 3.

Первое исследование соответствует рассмотрению притока в пласте мощностью 34 м, ограниченном водоупорной кровлей на отметке 57.

Основные размеры, подлежащие моделированию, приняты соответственно рис. 1 и отвечают условиям работы третьего яруса иглофильтров.

Моделирование притока к ряду иглофильтров основывалось на предположении условий работы иглофильтров как сплошной дрены щелевидного очертания. Следовательно, рассматривалось плоское движение в водоносном пласте, характеризуемом постоянным коэффициентом фильтрации. Поскольку приток с обеих сторон к котловану совершенно одина-

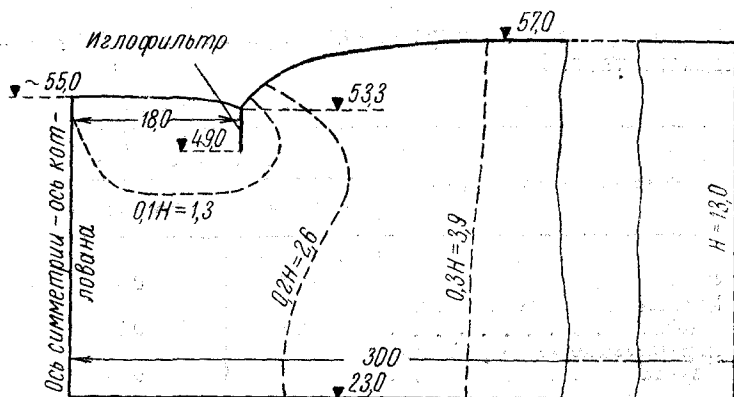


Рис. 5. Копия опытной модели

ков, рассматривалась лишь половина расчетной схемы рис. 1. Модели выполнялись из специальной электропроводной бумаги, сопротивление которой близко к 20 000 ом на 1 см².

Как видно из рис. 5, представляющего копию опытной модели первого исследования, эта модель ограничена с одной стороны вертикальной осью котлована (ось симметрии), с другой — областью питания, принимаемой соответственно расчетам на расстоянии 120 м от оси котлована, с третьей стороны границей является водоупор и с четвертой — ветви кривой депрессии и верхняя водоупорная кровля.

Электродом в области питания служила толстая латунная шина, роль иглофильтра выполняла специальная медная шина толщиной около 1,2 мм. Опыт производился при напряжении около 15 в, при силе тока в несколько миллиампер.

Поскольку положение кривых депрессий заранее не было известно, в опыте очертание их было принято приближенным. В дальнейшем опытным путем находились точки линий равного напора таким образом, чтобы они соответствовали необходимым геометрическим отметкам. При этом приходилось корректировать кривые депрессии путем удаления с модели части материала и опыт повторять вновь.

После нескольких указанных попыток были найдены достаточно удовлетворительные кривые депрессии и соответствующие им линии равного напора. При этом в опытах обращалось внимание преимущественно на депрессионную область под дном котлована и допускались некоторые неточности при определении кривой депрессии вне котлована потому, что положение этой ветви кривой депрессии существенного влияния на положение кривой депрессии под дном котлована не имеет.

Результаты опыта, выполненного в масштабе 1 : 400, представлены на рис. 5. Отметка кривой депрессии в интересующей точке по оси котлована соответственно получилась равной 55.

Второе исследование отличалось от первого лишь тем, что в соответствии со схемой рис. 3 водоносный пласт характеризовался как безнапорный, следовательно, с верхней стороны модель была ограничена кривой депрессии, которая, как и в первом исследовании, устанавливалась подбором. В этом случае отметка кривой депрессии по оси котлована оказалась практически такой же, как и для первого случая, т. е. около 55.

Заключение

Результаты расчетов по определению притока к одному иглофильтру приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетная схема или формула	Значение q ($\text{м}^3/\text{час}$) при режиме движения	
	напорном	безнапорном
Формула Козени	0,39	0,30
Кольцевой несовершенный дренаж	0,20	0,15
Параллельные несовершенные дрены	—	0,29

Для определения z по видоизмененной формуле П. П. Аргунова было принято среднеарифметическое значение $q = 0,27 \text{ м}^3/\text{час}$ и получены максимальные отметки кривой депрессии в центральной части котлована для схемы напорного движения 54,3 и для схемы безнапорного 55,1. Сравнение этих данных с опытными, полученными по методу ЭГДА (для напорного и безнапорного режимов около 55), показало их вполне удовлетворительную сходимость.

Следует отметить, что при сооружении котлована под защитой водопонижительной установки, хотя специальных наблюдений за уровнем подземных вод не производилось, кривая депрессии под дном котлована, по видимому, была ниже отметки 59, поскольку высачивания воды не наблюдалось.

Анализируя способы расчета притока к иглофильтру или вообще к другой какой-либо водопонижающей выработке, можно установить, что наиболее близкое значение расхода к среднеарифметическому $0,27 \text{ м}^3/\text{час}$ дал способ параллельных несовершенных дрен — $0,29 \text{ м}^3/\text{час}$ (имеется в виду безнапорный режим).

Определение максимальной отметки кривой депрессии в точке O_2 (рис. 2) по видоизмененной формуле П. П. Аргунова, исходя из расходов, указанных в табл. 1, приведено в табл. 2.

Как показывает табл. 2, формула Козени в данном случае дала завышенные значения q , поскольку превышение z над динамическим уровнем у иглофильтров оказалось отрицательным, что невозможно.

Расчет по схеме кольцевого дренажа дает, хотя и несколько заниженные значения q , но величина z получилась допустимой и лишь для условий безнапорного режима завышенной.

Расчет по схеме параллельных несовершенных дрен приводит к наиболее близким опытным величинам.

Таблица 2

Расчетная схема или формула	Режим движения	z — максимальная отметка	Превышение над динамическим уровнем у игло-фильтра
Формула Козени	Напорный	49,10	—4,40
	Безнапорный	53,05	—0,45
Кольцевой несовершенный дренаж	Напорный	57,35	+3,85
	Безнапорный	59,50	+6,00
Параллельные несовершенные дрены	Напорный	57,35	+3,85
	Безнапорный	53,45	—0,05

Поэтому при определении расхода q для одной выработки удлиненной водопонижительной установки можно рекомендовать способ параллельных дрен как более простой способ расчета по сравнению со способом несовершенного кольцевого дренажа. Кольцевой дренаж при значительном числе выработок весьма громоздок и требует значительных трудоемких вычислений.

Таким образом, как видно из изложенного, для удлиненной формы водопонижительной установки расчет водопонижения по способу П. П. Аргунова [5] неприменим и можно рекомендовать его видоизмененную формулу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов С. К. Гидрогеологические расчеты дренажей на участках, защищаемых от подтопления. Углетехиздат, 1951.
2. Абрамов С. К. Гидрогеологические расчеты притока воды в котлованы и искусственного понижения уровня грунтовых вод. Углетехиздат, 1952.
3. Аравин В. И. и Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. Стройиздат, 1948.
4. Аравин В. И. и Нумеров С. Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1953.
5. Аргунов П. П. Расчет водопонижительных установок. Сб. «Строительное водопонижение и гидромеханика грунтовых вод». Машстройиздат, 1950, № 15.
6. Бабушкин В. Д. Указания по определению коэффициента фильтрации при опытных откачках из несовершенных скважин. Госгеолиздат, 1950.
7. Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод. Госгеолиздат, 1943.
8. Керкис Е. Е. Определение радиуса влияния при расчете притока воды к колодцам, котлованам и горным выработкам и при проектировании водопонижения. Углетехиздат, 1955.
9. Козлов В. С. Расчет дренажных сооружений. Госстройиздат, 1940.
10. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Гостоптехиздат, 1949.
11. Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты горизонтального дренажа гидростанций и промышленных сооружений (при конечной глубине водопроницаемого слоя). Известия Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева, 1947, том XXXIV.
12. Указание по монтажу и эксплуатации легких иглофильтровых установок (Официальное руководство Технического управления Министерства машиностроения). Машстройиздат, 1950.
13. Чарный И. А. Об интерференции несовершенных скважин. Известия АН СССР, ОТН, 1946, № 11.
14. Чертоусов М. Д. Специальный курс гидравлики. Госэнергоиздат, 1949.
15. Kozeny J. Theorie und Berechnung die Brunnen, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1933, № 9.
16. Kozeny J. Theorie und Berechnung die Brunnen, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1933, № 11. (Опубликование опечатки).