

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ТОПЛИВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ПРИ ГОСПЛАНе СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА  
ВНИИ

## ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

(Материалы к "Методическому пособию по дренажу  
месторождений полезных ископаемых, подлежащих  
разработке открытым способом")

Часть II

Ленинград  
1965

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ТОПЛИВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ПРИ ГОСПЛАНе СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА  
ВНИИ

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ  
ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

(Материалы к "Методическому пособию по дренажу  
месторождений полезных ископаемых, подлежащих  
разработке открытым способом")

Часть II

Ленинград  
1965

# ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
В в е д е н и е . . . . .	3
Глава I. Общие вопросы фильтрационных расчетов .	
§ 1. Типизация условий фильтрации . . . . .	6
§ 2. Пути типизации условий фильтрации и определение основных расчетных параметров .	10
§ 3. Учет некоторых дополнительных факторов . . .	27
§ 4. Построение сетки движения. Метод "деформир- уемых линий тока" : . . . . .	31
§ 5. Рекомендуемый порядок расчета. . . . .	31
Глава II. Установившийся режим фильтраций	
§ 1. Расчет фильтрации к скважинам горизонтальной выработки и к другим типам скважин . . . . .	36
§ 2. Расчет водонапорных скважин . . . . .	42
Глава III. Неуставившийся режим . . . . .	
§ 1. Расчет фильтрации к скважинам горизонтальной выработки . . . . .	54
§ 2. Расчет водонапорных скважин . . . . .	64
Таблица - шифр . . . . .	75
Л и т е р а т у р а . . . . .	78
П р и л о ж е н и я . . . . .	81

## А н н о т а ц и я

В книге изложена методика фильтрационных расчетов дренажных систем на карьерах. Обоснованием методики явился анализ решений отдельных фильтрационных задач, предложенных различными авторами, а также анализ большого числа проектов осушения карьеров.

Книга предназначена для использования при проектировании, строительстве и эксплуатации карьеров.

В составлении работы участвовали:

канд.геол.-мин.наук МИРОНЕНКО В.А.,

инженеры НОРВАТОВ Ю.А. и БОКИЙ Л.Л.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных этапов проектирования осушительных систем на карьерах является проведение фильтрационных расчетов. Хорошо известно, что правильный выбор расчетной схемы, отвечающей конкретной гидрогеологической и горнотехнической обстановке, является необходимым условием для обоснования эффективных дренажных мероприятий. Несмотря на это, в настоящее время в проектах осушения карьеров нередко используются расчетные методы и формулы, непригодные для рассматриваемых гидрогеологических условий, что объясняется рядом причин.

Прежде всего, открытые горные работы стали существенно развиваться лишь в последние годы, и при проектировании осушения карьеров часто полностью копируются расчетные методы, разработанные для условий подземных горных работ; между тем карьеры, с точки зрения фильтрационных расчетов, имеют свои специфические особенности. Кроме того, стремясь к использованию наиболее простых расчетных зависимостей, проектировщики нередко прибегают к такой схематизации условий, при которой расчеты теряют всякую ценность. Наконец, многие принципиальные вопросы расчетов дренажа карьеров пока еще очень слабо отражены в специальной литературе, посвященной осушению горных предприятий.

Ввиду того, что погрешности фильтрационных расчетов, в конечном счете, приводят к снижению эффективности дренажных работ и к большим непроизводительным затратам, представляется целесообразным дать развернутые рекомендации по этому вопросу. Такие рекомендации даются в настоящей работе, составленной на основе анализа ошибок, наиболее часто встречающихся в проектах осушения карьерных полей.

Дренаж карьеров обычно связан со строительством и эксплуатацией мощных водопонижительных сооружений, требующих значительных экономических затрат. Поэтому проектирование осушения карьеров должно опираться на достаточно надежные методы, каковыми являются аналитический и экспериментальный. Это, конечно, не исключает возможности и целесообразности применения в ряде случаев - на первых стадиях проектирования - метода гидрогеологической аналогии.

из множества имеющихся аналитических решений различных задач авторы стремились выбрать лишь теоретически обоснованные решения с наиболее широким кругом применимости. Вместе с тем, авторы, по возможности, старались избегать решений, которые, из-за стремления к излишней точности, являются чрезмерно громоздкими и неудобными для использования. Такой подход обусловлен тем, что требуемая точность расчетного метода в значительной мере определяется точностью исходных показателей. Для некоторых фильтрационных задач предлагаются новые решения.

Из экспериментальных методов делается основной упор на моделирование на приборе ЭГДА; этот точный и простой метод уже нашел весьма широкое применение при проектировании осушения карьеров. Моделирование неустановившейся фильтрации на гидроинтеграторе и на сеточных интеграторах в работе не рассматривается, так как они пока очень слабо используются в практике проектирования дренажных мероприятий при ведении горных работ.

Настоящая работа будет положена в основу соответствующего раздела "Методического пособия по дренажу месторождения полезных ископаемых, подлежащих разработке открытым способом", которое будет полностью составлено УкрНИИПроектом и ВНИИ к концу 1966 г. X).

#### Условные обозначения

- $x, y$  - декартовы координаты на плоскости;
- $r$  - координата при осесимметричном движении;
- $k$  - коэффициент фильтрации;
- $\mu$  - водоотдача;
- $H(h)$  - напор - при напорном движении, глубина (мощность) потока -  
- при безнапорном;
- $H_0(h_0)$  - первоначальный напор (глубина) в расчетной точке;
- $H_1(h_1)$  - напор (глубина) на контуре питания;
- $H_2(h_2)$  - напор (глубина) на контуре дренажа;
- $H_c(h_c)$  - напор (глубина) в скважине;
- $H_{\infty}(h_{\infty})$  - первоначальный напор (глубина) в скважине;

---

х) Одновременно выпускаются материалы к первой части указанного пособия ("Осушение карьерных полей").

- $h_b$  - высота промежутка высачивания;
- $h_k$  - глубина воды в затопленном котловане;
- $H_{\text{ф(нф)}}$  - средний напор (глубина) на линии ряда скважин;
- $m$  - мощность напорного горизонта;
- $Q_0$  - дебит водопонижительной установки;
- $Q_k$  - общий приток к котловану;
- $Q_H$  - производительность насоса;
- $Q_c$  - дебит скважины;
- $Q_{вз}$  - водозахватная способность скважины;
- $q$  - погонный приток (удельный расход);
- $q_0$  - удельный расход потока, вытекающего на откос;
- $i$  - уклон водоупора;
- $L$  - расстояние между областями питания и дренажа;
- $\omega$  - интенсивность инфильтрации;
- $\alpha$  - коэффициент уровнепроводности при безнапорном движении;
- $\beta$  - коэффициент пьезопроводности при напорном движении;
- $S$  - понижение уровня подземных вод;
- $R$  - расчетный радиус влияния;
- $R_*$  - минимальное (действительное) расстояние от выработки до контура питания;
- $r_c$  - радиус скважины;
- $d_c$  - диаметр скважины;
- $r_k$  - приведенный радиус котлована или водопонижительного контура;
- $\delta$  - расстояние между скважинами;
- $F, P$  - площадь и периметр дренажного контура или котлована (на высоте промежутка высачивания);
- $l_1, l_2$  - расстояние от дрены (центра котлована или линейной установки), соответственно, до областей питания и стока;
- $\delta$  - расстояние от центра дрены до центра круговой области питания;
- $d, b$  - длина и ширина дренажного контура (карьера); в частном случае  $b$  - ширина дренажной траншеи;
- $\gamma$  - коэффициент несовершенства дрены;
- $T$  - расстояние от дна несовершенной выработки до водоупора;
- $l$  - заглубление выработки в водоносный горизонт;
- $d_{50}$  - средний диаметр частиц грунта;
- $\rho$  - угол внутреннего трения грунта.

Для облегчения использования материала в конце книги дается таблица-шифр.

## Глава 1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ

### § 1. Типизация условий фильтрации

#### А. Типизация условий на границах области фильтрации

Чаще всего условия на границах области фильтрации задаются в виде:  $H = f_1(t)$  — напор как функция времени, или  $q = f_2(t)$  — расход как функция времени. Частными случаями являются условия  $H = \text{const}$  и  $q = \text{const}$ ; они наиболее просты с расчетной точки зрения, и, нередко аппроксимируются более сложные условия.

Условие постоянства напора на границе водонесного горизонта соблюдается в случае контакта пласта с пластом значительно большей проводимости ( $k_1 m_1 < (\frac{1}{20} + \frac{1}{40}) k_2 m_2$ ), статические запасы которого весьма велики. Постоянный напор на границе пласта принимается и в том случае, когда питание пласта осуществляется за счет водоема или реки, воды которых гидравлически тесно связаны с подземными водами.

Здесь часто встречается одна характерная ошибка: за контур питания с постоянным напором принимают водоем или реку с закольцованным (слабопроницаемым) руслом. Между тем, при длительном водопонижении депрессионная поверхность может в этом случае "оторваться" от подошвы слабопроницаемых грунтов, слагающих русло. Поэтому в дальнейшем поступление воды из реки (водоема) будет происходить в виде инфильтрации (движение с частичным заполнением пор водой), величина которой не зависит от понижения в данной точке пласта. Следовательно, в подобных условиях река (водоем) не может приниматься за контур питания с постоянным напором.

Постоянный напор на границе области фильтрации может быть обусловлен также постоянством уровня<sup>х)</sup> в котловане (траншее, дренажном штрее, колодце и т.д.). Это же условие соблюдается при работе скважных

---

х) Этот уровень, в частности, может быть и нулевым.



и забивных фильтров, поглощающих и самоизливающих скважин, а также скважин, оборудованных насосами, работающими "на приток" (см. ниже). Наконец, иглофильтровые установки также можно рассчитывать как системы с заданным постоянным напором (понижением). Это понижение определяется (при нормальной работе иглофильтровой установки) вакуумом, развиваемым насосом ( $h_{BK}$ ), превышением  $h_{BK}$  насоса относительно непониженного уровня подземных вод  $h_H$  и гидравлическими потерями ( $h_r$ ) в системе /25/:  $S_H = h_{BK} - h_H - h_r$

Обычно для легких иглофильтров  $h_{BK} = 8$  м,  $h_r = 1,5-2,5$  м. Понижение  $S_H$  отсчитывается от первоначального уровня на линии заложения иглофильтров.

Условие постоянства расхода на границе пласта принимается, например, в том случае, когда эта граница является непроницаемой ( $q = 0$ ), а также во всех случаях, когда поступление воды в пласт вдоль этой границы практически не зависит от величины понижения уровня на ней (например, когда питание на этой границе идет из тектонической зоны, поступление воды в которую ограничено величиной инфильтрации постоянной интенсивности).

Условие постоянства расхода на границе области фильтрации выполняется также при работе скважин с постоянными дебитами (см. ниже).

Остановимся несколько подробнее на условиях работы водопонижительных скважин, оборудованных насосами. Здесь при неустановившемся режиме возможны три вида условия: 1) скважины при постоянном расходе ( $Q_c = \text{const}$ ), 2) скважины при постоянном понижении ( $h_c = \text{const}$ ), 3) скважины при переменных расходе и понижении.

Третий вид условий обычно может наблюдаться лишь в течение непродолжительного периода, так что мы будем рассматривать лишь первые два условия.

Работа скважин при постоянных расходах, равных произвольности насосов, возможна в тех случаях, когда внешний приток превышает производительность насоса  $Q_H$ . Чаще всего такие условия наблюдаются в первые периоды водопонижения, когда неустановившийся режим фильтрации выражен наиболее резко. При установившемся режиме они встречаются в скважинах, окружающих несовершенный котлован.

Работа скважин при постоянном понижении возможна в том случае, когда при максимально возможном понижении<sup>x)</sup> внешний приток меньше  $Q_H$ . Максимальное понижение определяется или глубиной установки насосов, или отметкой водоупора (когда насосы заглублены ниже водоупора).

номинальной производительности насоса. Чаще всего такие условия наблюдаются в скважинах, окружающих совершенный котлован. Ясно, что при установившемся режиме фильтрации условия  $h_c = \text{const}$  и  $Q_c = \text{const}$  выполняются одновременно.

## Б. Типизация областей фильтрации по взаимному расположению их границ (в плане)

При фильтрационных расчетах не требуется учитывать расположение карьеров и водозаборных сооружений относительно границ водоносных пластов. Пространственное положение этих границ обычно может приниматься неизменным во времени. Однако, в некоторых случаях в расчетах приходится учитывать перемещение границ водоносного горизонта: при постепенном "истощении" наклонно залегающего пласта, при сравнительно быстром перемещении контура совершенного котлована и т.п. С расчетной точки зрения эти случаи являются, как правило, весьма сложными; аналитические решения найдены лишь только для простейших схем (см. гл. III).

Мы будем, в основном, рассматривать фильтрацию в условиях водоносных пластов с неподвижными границами. С целью учета их влияния на процесс дренирования природная обстановка, по возможности, схематизируется и водоносный пласт приводится к одной из следующих схем.

### 1. Пласт весьма больших размеров ("неограниченный пласт").

К такой схеме приводятся чаще всего пласты в условиях горизонтального залегания, когда их границы расположены на таком удалении от водопонижительной установки (карьера), что они практически не оказывают влияния на процесс водопонижения.

При расчете в условиях неустановившегося режима подземных вод один и тот же пласт может рассматриваться как неограниченный — в первоначальные периоды действия водопонижительной установки, и как ограниченный — при длительном действии водопонижительной установки.

### 2. Пласт, ограниченный одним прямолинейным контуром ("полуограниченный пласт")

#### а) На контуре задан постоянный напор.

Такие условия соответствуют, например, области, примыкающей к крупной речной долине, когда питание рассматриваемого горизонта в процессе дренирования его идет за счет вод реки или весьма водообильного горизонта, приуроченного к аллювиальным отложениям.

б) На контуре пласта задан постоянный расход.

К такой схеме приводятся, например, пласты, примыкающие к прямолинейным непроницаемым границам (в этом случае  $q = \text{const} = 0$ )

3. Пласт, ограниченный двумя параллельными  
прямолинейными контурами  
(полосообразный пласт)

а) На контурах задан постоянный напор.

б) На контурах задан постоянный расход.

в) На одном из контуров задан постоянный расход, на другом — постоянный напор.

4. Пласт, ограниченный двумя прямолинейными  
контурами, пересекающимися под прямым углом  
(пласт-квадрант)

а) На обоих контурах задан постоянный напор.

б) На обоих контурах задан постоянный расход.

в) На одном контуре задан постоянный расход, на другом — постоянный напор.

5. Пласт, ограниченный круговым или  
близким к нему по форме контуром

В гидромеханическом смысле к такой схеме нередко приводятся водонесные горизонты, приуроченные к синклинали (мульдобразно) залегающим породам. В зависимости от характера питания горизонта на границе рассматриваемого кругового пласта может быть задан или постоянный напор, или постоянный расход. Последний случай является более частым.

Перечисленные виды граничных условия в дальнейшем мы будем называть типовыми: для фильтрации в этих условиях найдены точные аналитические решения.

Все остальные виды граничных условия мы будем в дальнейшем называть сложными.

Сюда, в частности, относится случай расположения водопонижительных скважин вблизи совершенных или затопленных котлованов, т.е. в этом случае котлован следует рассматривать как границу водоносного горизонта.

## В. Типизация условий питания горизонтов по площади их распространения

### 1. Питание горизонта за счет инфильтрации

Одним из источников питания водоносных горизонтов является инфильтрация вод (атмосферных, болотных и т.п.) по площади. Если при работе карьера сохраняется "естественный" характер инфильтрации (например, инфильтрация атмосферных осадков), то при расчетах по формулам неустановившегося движения, приводимых в гл. III, она "автоматически" учитывается путем отсчета понижения уровней подземных вод от "естественных" /28/. В противном случае инфильтрация должна учитываться специальным расчетом (см. гл. II, § 1, п. В).

### 2. Питание (или разгрузка) горизонтов за счет "перетекания"

Для неоднородных слоистых толщ водоносных пород существенное значение может иметь "перетекание" воды через слабопроницаемые ("водоупорные") слои из одного водоносного горизонта в другой, причем этот процесс иногда имеет существенное значение даже при весьма малых коэффициентах фильтрации слабопроницаемых слоев (порядка  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$  м/сутки). "Перетекание" особенно важно учитывать для напорных пластов большой протяженности.

Формулы для учета "перетекания" приведены в гл. II, § 1, п. Г.

### § 2. Принципы схематизации условий фильтрации и определение основных расчетных параметров

В настоящем параграфе рассматриваются принципы схематизации условий фильтрации, позволяющие внести в расчетную схему некоторые (оправданные) допущения и тем самым - существенно упростить ее. Схематизация осуществляется обычно путем введения в расчет некоторых, вообще говоря, фиктивных (расчетных) параметров.

Отметим, что в дальнейшем мы будем приводить формулы, в основном, для условий безнапорной фильтрации. Для перехода к соответствующим формулам напорного движения следует осуществить замену выражения  $(h_0^2 - h^2)$  на выражение  $2m\delta$  и коэффициента уровня непрочности "а" - на коэффициент пьезопроводности "β".

## А. Приведение планового потока к плоскому одномерному

Движение называется **плоским** в плане или в разрезе, если все линии тока параллельны горизонтальной плоскости (плоское в плане) или вертикальной плоскости (плоское в разрезе).

Примером плоского в плане движения является фильтрация в водоносном пласте, подстилаемом горизонтальным водоупором, на участках, удаленных от контуров питания и стока (линии тока в этом случае можно считать параллельными плоскости водоупора). Движением, плоским в разрезе, является фильтрация в однородном пласте при параллельных контурах питания и стока - при значительной их длине (например, фильтрация между двумя параллельными реками).

Плоским одномерным, или линейным, называется такое плоское движение, при котором все линии тока параллельны друг другу (например, движение в напорном пласте постоянной мощности при параллельных контурах питания и стока).

Плоское одномерное движение подземных вод является наиболее простым с расчетной точки зрения, т.к. оно зависит только от одной переменной ( $x$ ); это движение определяется формулой:

$$q = k \frac{h^2(x_1) - h^2(x_2)}{2L}, \quad (1.1)$$

где  $L = x_1 - x_2$ .

Весьма часто представляется целесообразным приводить более сложные формы движения, зависящие от двух координат на плоскости  $x, y$  (плановая фильтрация), к одномерному плоскому движению. Для этого строятся линии равных напоров (экипотенциали) и линии тока планового потока (§ 4) и выделяются характерные расчетные ленты тока (рис.1), после чего сложное плановое движение в пределах ленты приводится к одномерному плоскому путем введения расчетной длины пути фильтрации /35/:

$$L_p = n \left( \frac{B_k}{l} \right)_{cp}, \quad (1.2)$$

где  $n$  - число отсеков в ленте тока,  $B_k$  - ширина ленты на контуре стока,  $\left( \frac{B}{l} \right)_{cp}$  - среднее отношение ширины отсека к его длине (строго говоря оно должно быть постоянным для всех отсеков).

---

х) За "х" может быть принято, например, расстояние от расчетной точки до контура стока.

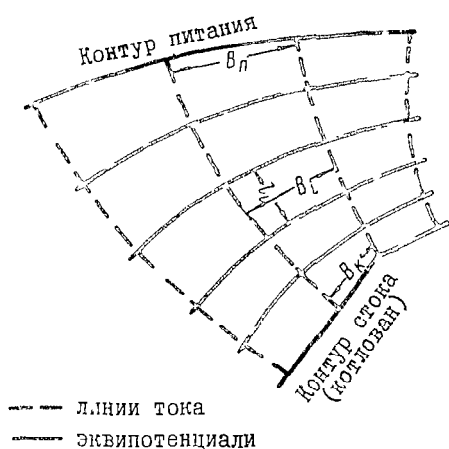


Рис. I. Схема ленты тока

При подстановке в них вместо действительных расстояний — приведенных, снимаемых с построенного графика  $x_p = f(x_d)$ .

Пример на приведение ленты к плоской рассмотрен в приложении № 3.

### Б. Ф о р м у л а "б о л ь ш о г о к о л о д ц а"

В дальнейшем особо выделяется осесимметричное движение. Движение называется осесимметричным относительно некоторого центра, если величины скоростей и напоров в данной точке зависят только от удаления этой точки от центра симметрии. Типичным случаем осесимметричного движения является фильтрация к скважине в условиях бассейна подземных вод<sup>х)</sup>. Как и плоское одномерное движение, осесимметрическое движение зависит только от одной координаты ( $r$ ); оно подчиняется уравнению:

$$Q = \frac{\pi k [h^2(r_1) - h^2(r_2)]}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (1.4)$$

х) Под "бассейном" понимается неограниченный пласт с одинаковым естественным уровнем во всех точках.

Формула (1.4) находит широкое применение при расчетах дебитов в условиях движений, отличных от осесимметричных. В общем случае она записывается в виде (формула "большого колодца"):

$$Q = \frac{1,37k(h_1^2 - h_2^2)}{\lg \frac{R}{r_k}}, \quad (1.5)$$

где  $R$  — расчетный "радиус влияния" (см. § 2 п.В).

Формула (1.5) применима при выполнении условия  $\frac{\delta_k}{R} > 0,1$ , где  $\delta_k$  — минимальное расстояние от центра дрены до контура питания. Для дрен больших размеров (котлованы, трашеи) должно, кроме того, выполняться соотношение  $\frac{\delta_k}{d} > 0,5$ , где  $d$  — максимальный размер выработки (в плане). Наконец, для условий неустановившейся фильтрации имеются дополнительные критерии применимости приведения к "большому колодцу" (гл. III).

Для расчета уровней формула "большого колодца" может использоваться только при осесимметричном движении. В формулу (1.5) входят расчетные величины  $R$  и  $r_k$ . Методы их определения описаны ниже.

## В. 1. Определение расчетного "радиуса влияния"

Расчетный "радиус влияния" представляет собой величину, которая, будучи подставлена в расчетные зависимости для определения дебита (формула (1,5)), дает возможность получить действительные значения водопритоков.

Расчетный "радиус влияния" отличается от действительного, который определяется размерами области, где наблюдается заметное изменение первоначального уровня подземных вод под действием водопонижения. При установившемся режиме фильтрации величина расчетного "радиуса влияния" должна быть постоянной. При неустановившемся режиме она является функцией времени.

### 1. Определение расчетного "радиуса влияния" при установившемся режиме фильтрации

а. В условиях неограниченного пласта величиной установившегося "радиуса влияния" можно пользоваться в следующих простейших случаях.

При питании безнапорного горизонта только за счет равномерной инфильтрации по площади бассейна /15/:

$$R\sqrt{\lg R - \lg r_k - 0,217} = 0,66\sqrt{\frac{k}{w}(2h_0 - S)S - 0,5r_k^2}. \quad (1.6)$$

Для плоского одномерного движения соответствующая формула имеет вид (приток - односторонний):

$$R = L = \sqrt{\frac{k}{4w} (2h_0 - S) S} \quad (1.6a)$$

При питании напорного горизонта только за счет "перетекания" из соседнего горизонта при условии, что уровень последнего является постоянным /24/:

$$R = 1,123 \sqrt{\frac{k m m_\theta}{k_\theta}}, \quad (1.7)$$

где индекс "θ" относится к слабопроницаемому слою, отделяющему рассматриваемый горизонт от водообильного горизонта, за счет которого происходит подпитывание x).

Формула (1.7) применима при условии  $\vartheta' = r_0 \sqrt{\frac{k_\theta}{k m m_\theta}} < 0,2$ ; если это условие не выполнено, то расчет ведется по формуле /22/:

$$R = r_0 e^{\frac{k_0(\vartheta')}{2k_1(\vartheta')}}, \quad (1.8)$$

где  $k_0$  и  $k_1$  - функции Бесселя второго рода - соответственно нулевого и первого порядков.

Для плоского одностороннего притока соответствующая формула имеет вид:

$$R = L = \sqrt{\frac{k m m_\theta}{k_\theta}} \quad (1.7a)$$

Для безнапорного горизонта, питающегося за счет залегающего ниже напорного горизонта, формуле (1.7) соответствует формула /24/:

$$R = 1,123 \sqrt{\frac{k m_\theta h_0^0}{k_\theta}}, \quad (1.9)$$

а формуле (1.7a) - формула:

$$L = \sqrt{\frac{k m_\theta h_0^0}{k_\theta}}, \quad (1.9a)$$

где  $h_0^0$  - первоначальная мощность безнапорного горизонта.

В целом, для условия неограниченного пласта во всех случаях, кроме описываемых формулами (1.6)-(1.9a), следует избегать использования величины "установившегося радиуса влияния" и вести расчет по формулам неустановившегося движения. Широко используемые эмпирические формулы Кусакина и Зихардта получены для узкого круга условий и малых значений радиуса выработки; поэтому применение этих формул для расчета осушения карьерных полей недопустимо /24/.

---

x) Формулы (1.7)-(1.9a) неприменимы в случае, когда "водоупорные" породы обладают начальным градиентом.



б. Выражения расчетного "радиуса влияния" для пластов с фиксированными границами в типовых условиях приведены в табл.1 /12/.

## II. Определение расчетного "радиуса влияния" при неустановившемся режиме фильтрации

а. Величина расчетного "радиуса влияния" при неустановившемся режиме  $/R(t)/$  может использоваться для определения величин водопритокков при заданном понижении на контуре дренажа, при условии  $R(t) < R_*$ , где  $R_*$  - расстояние до ближайшей границы пласта. Приближенная формула для нахождения  $R(t)$  имеет вид /31/:

$$R(t) = r_k + \sqrt{\pi a t} \quad (1.10)$$

Если понижение на контуре дренажа меняется по закону  $S = bt^\alpha$ , где  $b$  и  $\alpha$  - постоянные величины, то /16/.

$$R(t) = r_k + \sqrt{\frac{\pi + 4\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} at} \quad (1.10a)$$

В условиях плоского одномерного потока можно пользоваться формулами (1.10) и (1.10a) при  $r_k = 0$ .

Для напорных горизонтов в формулы (1.10) и (1.10a) вместо "a" подставляется "  $\beta$  " .

Для одномерного плоско-напорно-безнапорного движения в ограниченном пласте (рис.2) положение точки, разделяющей напорную и безнапорную зоны, определяется величиной  $l(t)$ , которую можно найти из формулы:

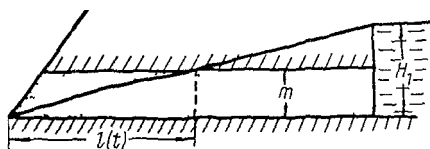


Рис. 2. Схема к расчету напорно-безнапорной фильтрации

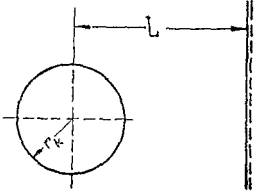
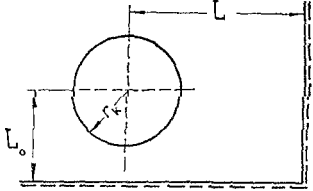
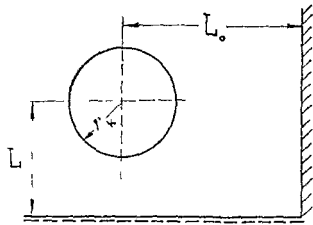
$$\frac{3k}{\mu} (2H_1 - m)t = l^2(t) - 2(L - L_0) \left[ L_0 \ln \frac{L_0 - l(t)}{L_0} + l(t) \right], \quad (1.11)$$

где

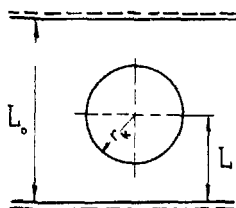
$$L_0 = \frac{mL}{2H_1 - m}.$$

б. Понятие "неустановившегося радиуса влияния" оказывается полезным для ориентировочного определения времени  $t_y$ , по истечении которого наступает режим, достаточно близкий к установившемуся (при наличии внешних границ с постоянным напором).

Таблица I

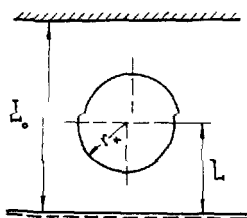
Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Выражение для R
1. Котлован у реки (у линейной границы с постоянным напором).		$R = 2L$
2. Котлован в углу между двумя границами с постоянным напором		$R = \frac{2LL_0}{\sqrt{L^2 + L_0^2}}$
3. Котлован в углу между границей с постоянным напором и непроницаемой границей		$R = 2L\sqrt{\frac{L^2}{L_0^2} + 1}$

4. Котлован  
между двумя  
границами с  
постоянным  
напором



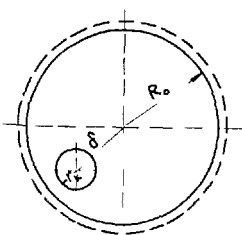
$$R = \frac{2}{\pi} L_0 \sin \frac{\pi L}{L_0}$$

5. Котлован  
между границей  
с постоянным  
напором и не-  
проницаемой  
границей



$$R = \frac{4}{\pi} L_0 \operatorname{tg} \frac{\pi L}{2L_0}$$

6. Котлован  
в круговой об-  
ласти с посто-  
янным напором  
на границе



$$R = R_0 - \frac{\delta^2}{R_0}$$

При постоянном напоре на контуре дренажа, на основании формулы (1.10), имеем (исходя из условия  $R(t) = R_*$ ):

$$t_y \approx \frac{(R_* - r_k)^2}{\pi a} \quad (1.12)$$

При постоянном дебите дренажной установки величины  $t_y$  зависят от формы потока в большей степени. Для плоского одномерного потока [6]:

$$t_y \approx 0,8 \frac{L_*^2}{a} \quad (1.13)$$

для осесимметричного движения [37]:

$$t_y \approx 0,5 \frac{(R_* - r_k)^2}{a} \quad (1.13a)$$

В формулах (1.12)–(1.13a) за  $R_*$  и  $L_*$  принимаются действительные расстояния до ближайших контуров питания.

Таким образом, ориентировочный расчет при  $t < t_y$  можно вести по формулам неустановившегося движения для бесконечного пласта, а при  $t \geq t_y$  – по формулам установившегося режима для конечного пласта с фиксированным напором на контуре питания.

### Г. Определение приведенного радиуса котлована (дренажного контура)

При определении приведенного радиуса выработки или водопонижительной установки, имеющих в плане форму, отличную от круговой, употребляются следующие формулы:

- 1) для невытянутых котлованов или контуров ( $\frac{b}{d} > 0,5$ ):

$$r_k = \frac{P}{2\pi} \quad (1.14)$$

где  $P$  – периметр выработки или водопонижительной установки.

- 2) для вытянутых котлованов или контуров ( $\frac{b}{d} \leq 0,5$ ):

$$r_k = \eta \frac{d + b}{4} \quad (1.15)$$

где  $\eta$  – определяется по табл. 2 [14]:

Т а б л и ц а 2

$b/d$	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0,5
$\eta$	1.05	1.08	1.12	1.144	1.16	1.174

3) для котлованов или контуров сложной формы /14/:

$$\lg r_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \lg r_i, \quad (1.16)$$

где  $r_i$  - расстояние от расчетной точки (например, центр котлована) до характерной точки на периметре котлована или водопонижительного контура (например, угловая точка);

$n$  - число характерных точек на периметре контура или котлована.

#### Д. Приведение напорно-безнапорного движения к безнапорному или напорному

Для расчета напорно-безнапорного установившегося движения целесообразно сводить его к условному безнапорному движению путем введения расчетной глубины потока ( $h_p$ ):

$$h_p = \sqrt{2mH - m^2} \quad (1.17)$$

Для случая неустановившегося движения аналитические решения получены лишь для нескольких частных задач /7/; ввиду ограниченного круга применимости этих решений, мы их здесь не приводим. Для расчета расходов в условиях неустановившейся напорно-безнапорной фильтрации могут быть рекомендованы следующие приемы:

а) для потоков ограниченной протяженности (расстояние между областями питания и стока  $L$  меньше 3-5 км) можно пользоваться формулой (1.1) при замене  $h_1$  на  $m$  и подстановке вместо  $L$  величины  $l(t)$  определяемой по формуле (1.11);

б) для потоков большой протяженности приближенный расчет можно вести с помощью подстановки (1.17), определяя величину условного "радиуса влияния" (см.п.В) по формулам для напорного движения. Такой прием рекомендуется при выполнении соотношения

$$0,3 < \frac{1}{H_0 - m} \sqrt{\frac{\beta m \mu}{k}} = A < 3;$$

при  $A < 0,3$  расчет может вестись по обычным формулам для напорного движения, а при  $A > 3$  - по обычным формулам для безнапорного движения (без учета напоров).

# Е. Задача рядов скважин и фиктивных траншеями (метод фильтрационных сопротивлений)

При постоянном расходе на водопонижительном контуре для упрощения расчетов часто оказывается целесообразным заменить ряд скважин фиктивной сплошной дренаж-совершенной траншеей<sup>х</sup>). Для этого на контуре вводится условная глубина потока  $h_p$  - для безнапорного движения или условный напор  $H_\Phi$  - для напорного /12/:

$$h_p = \sqrt{h_c^2 + \frac{Q_c}{\pi k} \ln \frac{\delta}{\pi d_c}} \quad (1.18)$$

$$H_\Phi = H_c + \frac{Q_c}{2\pi km} \ln \frac{\delta}{\pi d_c} \quad (1.19)$$

Выражение  $\frac{1}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\pi d_c} = \Phi_k$  носит название внутреннего фильтра-ционного сопротивления контура скважин и может быть определено по номограмме (рис. 3).

Величины  $h_p(H_\Phi)$  примерно соответствуют средним глубинам (напорам) по линии скважин /12/.

При близком расположении скважин ( $\delta < m$ ) к величине  $\Phi_k$  следует добавить дополнительное сопротивление

$$\Phi_{нк} = \frac{1}{2\pi} \ln \gamma \quad (1.20)$$

где  $\gamma$  определяется формулой (1.24).

В дальнейшем расчет понижения в любой точке пласта (за исключением точек, удаленных от ряда скважин на расстояние, меньшее  $\delta$ ) ведется по формулам, выведенным для совершенных траншей, при удельном притоке на 1 пог.м.траншеи  $q = \frac{Q_c}{\delta}$ . Для точек, удаленных от ряда скважин на расстояние, меньшее  $\delta$ , уровни могут определяться формулой /27/:

$$h = \sqrt{h_p^2 - \frac{2Q_c}{k} \Delta f} \quad (1.21)$$

где  $h_p$  - расчетный уровень, обусловленный действием условной траншеи,

$\Delta f = \Phi_k$  - внутри скважины,  
 $\Delta f = -\frac{1}{2\pi} \ln \left( 2 \sin \frac{\pi y}{\delta} \right)$  - на линии скважин ( $y$  - расстояние от расчетной точки до ближайшей скважины), в частности,

$\Delta f = -0,11$  - посередине между скважинами.  
 х) В принципе данный метод применим и при переменном расходе на контуре, однако в этом случае выводы существенно усложняются.

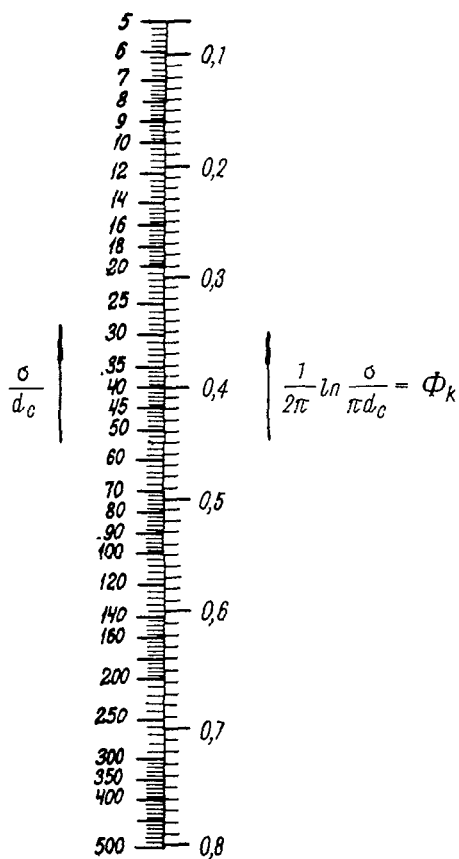


Рис.3. Номограмма для определения внутреннего сопротивления контура скважин

Отметим, что использование описанного приема допустимо как в условиях установившегося, так и не установившегося движения. Если расстояние между скважинами не превышает 100 м, то этим приемом можно пользоваться уже при числе скважин, большем двух /27/.

Применение метода фильтрационных сопротивлений проиллюстрировано в приложениях ПП 2 и 3.

### Ж. Замена несовершенных выработок совершенными

1. Учет несовершенства водопонижительных скважин и "несовершенства дренажного контура".

Работа несовершенной водопонижительной скважины может быть рассмотрена как работа эквивалентной совершенной скважины, радиус которой ( $r_{сс}$ ) определяется по формуле /12/:

$$r_{сс} = \alpha \cdot r_c, \quad (1.22)$$

$$\text{где} \quad \alpha = \exp \left[ - \frac{1 - \bar{b}}{\bar{b}} \left( \ln \frac{b}{r_c} - \varepsilon \right) \right] \quad (1.23)$$

(обозначения ясны из рис.4<sup>х</sup>),

$\varepsilon$  - определяется по графику (рис.4).

При пользовании графиком следует иметь в виду, что

$$\varepsilon(\bar{b}) = \varepsilon(1 - \bar{b}).$$

При близком расположении скважин ( $\delta < m$ ), величину  $r_{сс}$  следует определять с учетом коэффициента  $\gamma$  на "несовершенство дренажного контура" /12/:

$$r_{сс} = \alpha \cdot \gamma \cdot r_c, \quad \text{xx)} \quad (1.24)$$

$$\text{где} \quad \gamma = \exp \left[ \frac{1 - 0,96 \sqrt{\delta}}{\delta} \ln \sin \frac{\pi \bar{b}}{2} \right], \quad \delta = \frac{\delta}{m}.$$

Для скважин в безнапорном пласте значение  $m$  целесообразно принимать равным глубине подземных вод под дном несовершенного котлована, о контуренного водопонижительными скважинами, а  $b = m - c$  (рис.4). В случае совершенного котлована в качестве  $m$  принимается глубина котла  $h_f$  между скважинами (по контуру), определяемая по формуле (1.18), а  $b = h_f - c$ . Депрессионные кривые можно строить по формулам

х) В случае затопленного фильтра " $b$ " всегда измеряется длиной его рабочей части.

xx) Для совершенных скважин  $r_{сс} = \gamma r_c$



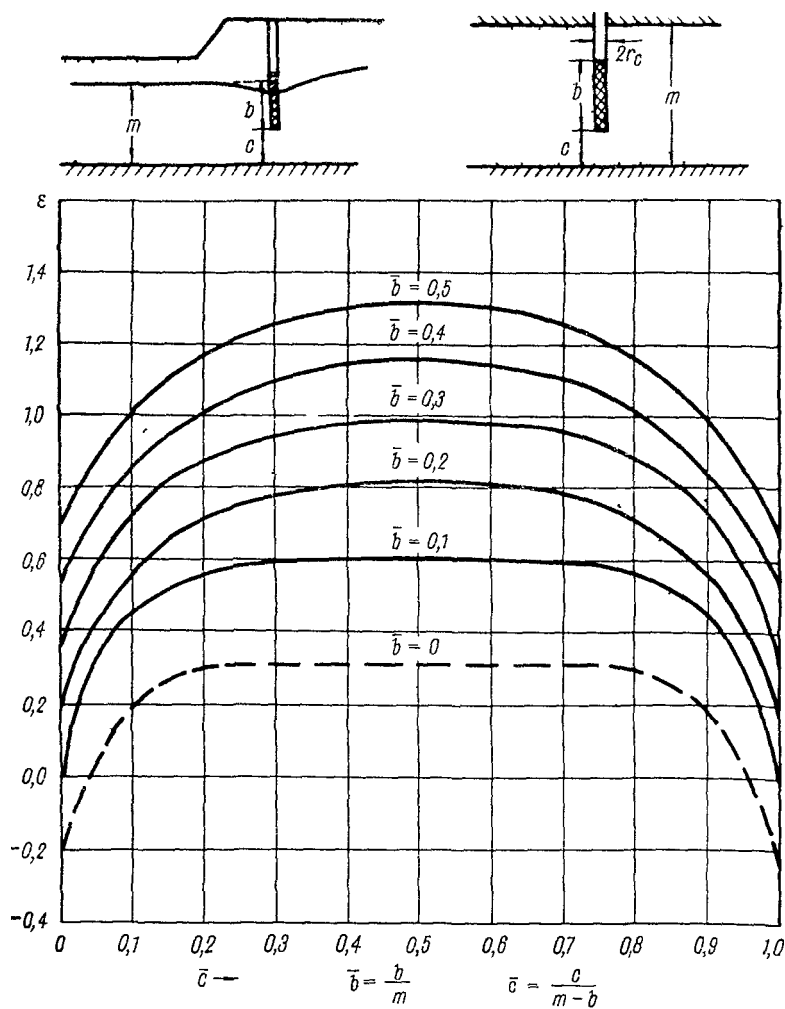


Рис. 4. График к определению приведенного радиуса скважины

для совершенных скважин, подставляя в них расход, подсчитанный с учетом несовершенства <sup>х)</sup>.

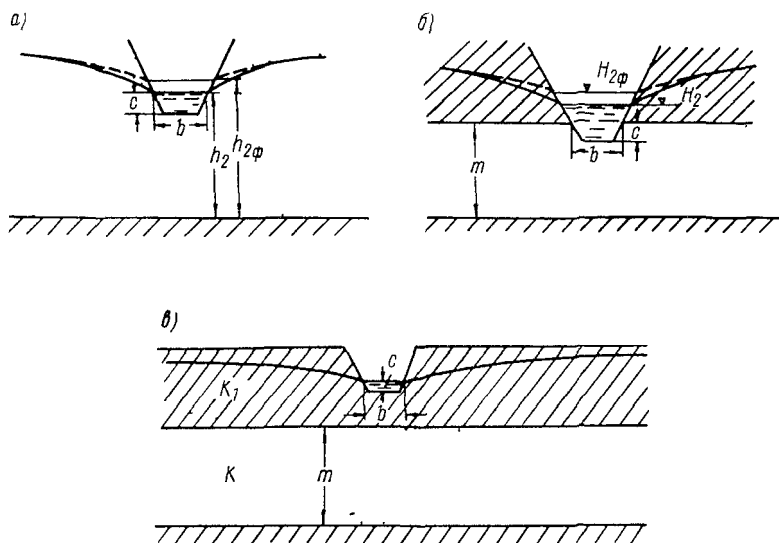


Рис. 5. Схемы к расчету несовершенной траншеи

## 2. Учет несовершенства котлованов и траншей

а. В толщах, однородных по проницаемости.

Котлованы и траншеи достаточно больших размеров ( $2b > m$  или  $2b > h_0$ , где  $b$  — минимальный размер выработки в плане) можно рассчитывать как совершенные, если выполнено условие  $\frac{m}{R_*} \leq 0,1$  или  $\frac{h_0}{R_*} \leq 0,1$ , где  $R_*$  — минимальное расстояние до контура питания/9/.

х) Это дает заметную ошибку лишь в зоне  $r < m$  — для напорных горизонтов и  $r < h$  — для безнапорных ( $r$  — расстояние от расчетной точки до скважины,  $h$  — глубина в этой точке).

Для траншей со сравнительно малыми поперечными сечениями ( $b < (0,5 \pm 0,25) m$  или  $b < (0,5 \pm 0,25) h_0$ ) целесообразно вводить на контуре траншеи фиктивный напор [36]:

$$h_{2ф} = \sqrt{h_2^2 + 1,46 \frac{q}{K} h_2 \lg \frac{h_2}{\pi r_{оф}}} \quad (1.25)$$

для безнапорных вод (рис.5а),

$$H_{2ф} = H_2 + 0,73 \frac{q}{K} \lg \frac{m}{\pi r_{оф}} \quad (1.26)$$

для напорных вод (рис.5б),

$$\text{где } r_{оф} = \eta \frac{b + 2c}{4}, \quad (1.27)$$

$c$  - рабочая глубина траншеи (рис.5);

$\eta$  - определяется по табл.2 при замене  $\frac{b}{d}$  на  $\frac{b}{2c}$  или на  $\frac{2c}{b}$ ,  $q$  - удельный двусторонний приток к траншее.

Порядок расчета в этом случае таков:

- 1) несовершенные дрены заменяются совершенными с уровнем в них  $h_{2ф} (H_{2ф})$ ;
- 2) составляются выражения (в алгебраическом виде) для расхода потока, считая дрены совершенными, с уровнями, равными  $h_{2ф} (H_{2ф})$ ;
- 3) с помощью формулы (1.25) или (1.26) исключаются неизвестные величины  $h_{2ф} (H_{2ф})$ .

Пример приведен в приложении № 2.

Для котлованов (зумпфов) сравнительно малых размеров ( $2b < m$  или  $2b < h_0$ ) может быть рекомендован следующий приближенный прием. На уровне дна котлована проводится условная "водоупорная" горизонтальная плоскость. Приток из верхней зоны определяется как для совершенных выработок, а из нижней - по формуле В.Д.Бабушкина [26]:

$$Q = \frac{6,28 K r_K S}{1,57 + \frac{r_K}{m} \left( 1 + 1,185 \lg \frac{R}{4m} \right)} \quad (1.28)$$

В формуле (1.28) за  $m$  принимается расстояние от дна котлована до естественного водоупора.

б. Для учета несовершенства в слоистых толщах в общем случае необходимо использовать метод РГДА; для характерного случая, изображенного на рис.5в, при  $\frac{K}{K_1} > 5$ , может рекомендоваться формула (1.26) при замене  $K$  на  $K_1$  и  $m$  - на  $4m$  [36].

### 3. Приведение неоднородных толщ к однородным

1. При напорном движении вертикальную неоднородность водоносного горизонта (случай слоистого строения) можно учесть введением расчетной величины коэффициента фильтрации /13/:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n k_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (1.29)$$

где  $n$  - число слоев.

2. В случае безнапорного движения вводится расчетная величина /14/:

$$\left( \frac{Kh^2}{2} \right)_{\text{рас}} = \varphi(x) = \sum_{i=1}^n k_i m_i [h(x) - z_i], \quad (1.30)$$

где  $h(x)$  - действительная глубина потока в рассматриваемом сечении,  
 $z_i$  - расстояние от горизонтального водоупора до середины слоя (см.рис.6).

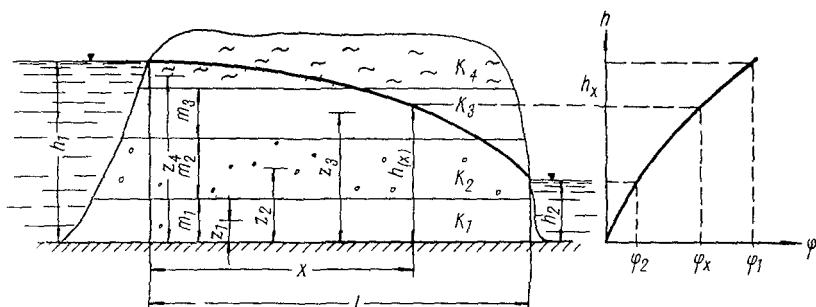


Рис. 6. Схема к расчету безнапорной фильтрации в условиях  
многослойной толщи

При этом расчет проводится в такой последовательности /26/:

а) строится график зависимости  $\varphi(x) = f[h(x)]$ ; для этого в формуле (1.30) задаются произвольными значениями  $h$  в пределах от  $h_2$  до  $h_1$ ;

б) определяется расход по формуле:  $q = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{L}$ ;

в) определяются величины  $\varphi(x)$  в точках, где требуется определить величину  $h(x)$   $\varphi(x) = qx + \varphi_2$ ,

г) по полученным величинам  $\varphi(x)$  с графика  $\varphi = f(h)$  снимают соответствующие значения  $h(x)$ .

Расчет по формулам (1.29) и (1.30) следует вести при условии, что отношение коэффициентов фильтрации соприкасающихся слоев  $\frac{k_{\lambda}}{k_{\lambda+1}} < 20$ , а  $\frac{k_{\lambda} m_{\lambda}}{k_{\lambda+1} m_{\lambda+1}} < 40 / 4$ . В противном случае расчет слоистой толщи должен вестись по отдельным горизонтам (при необходимости - с учетом перетекания).

3. При расчетах неустановившегося движения в неоднородных по вертикали безнапорных водоносных горизонтах расчетная величина водоотдачи  $\mu$  на каждом этапе осушения будет, вообще говоря, различной. При изменении водоотдачи не более, чем в 2 раза, она может быть осреднена для всего периода осушения пласта.

Для широко распространенного случая двуслойной среды, когда основной водоносный горизонт перекрывается слабопроницаемым слоем, в пределах которого и располагается депрессионная воронка, можно считать:

$$\mu_{\text{ср}} = \mu_{\text{верхн}}, \quad (mk)_{\text{ср}} = (mk)_{\text{нижн}}$$

#### 4. Расчет неоднородных в плане толщ.

Приведение неоднородных в плане пластов (рис. 7) к однородным производится путем введения фиктивной длины пути фильтрации (в зоне II на рис. 7):  $l_{\text{фигт}} = l_{\text{действ}} \frac{k_1 m_1}{k_2 m_2}$ . (1.31)

Для безнапорных условий можно пользоваться формулой:

$$l_{\text{фигт}} = l_{\text{действ}} \frac{k_1}{k_2} \quad (1.32).$$

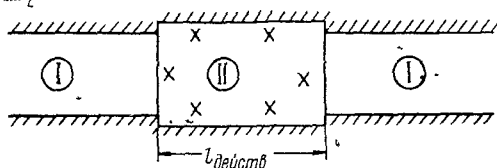


Рис. 7. Схема к расчету горизонтально - неоднородной толщи

### § 3. Учет некоторых дополнительных факторов

#### А. Об учете естественных градиентов потока

Расчетные формулы обычно выводятся для условий бассейна подземных вод, т.е. горизонта с одинаковой естественной отметкой уровня во всех точках. Между тем, во многих случаях существенную роль играет наличие естественного градиента потока. Учет его может проводиться при наличии карт гидроизогипс (гидроизопьез). Для этого расход рассчитывается по обычным формулам, с той только разницей, что

расчетное понижение отсчитывается от естественного уровня на месте заложения дрены.

## Б. Учет уклона и "волнистости" водоупора в условиях безнапорной фильтрации

Расчет в случае наклонного водоупора ведется по выделенным лентам тока (см. § 4). Для построения лент напоры на границах отсчитываются от произвольной горизонтальной плоскости сравнения. Затем ленты приводятся к плоским (§ 2 п.А). Расчет водопритокков в пределах отдельной ленты может проводиться по формулам, выведенным для случая горизонтального водоупора, при замене выражения  $(h_M^2 - h_K^2)$  на  $(h_M + h_K) \Delta H_{MK}$ , где  $\Delta H_{MK}$  - разность абсолютных отметок уровней в точках М и К. Такой прием дает достаточно хорошие результаты при соотношении исходных величин, отраженном на рис.8 (зона 1). В прочих случаях рекомендуется пользоваться графиками (рис.8).

Расчет неуставившейся безнапорной фильтрации при наклонном водоупоре может приближенно проводиться по формулам, выведенным для горизонтального водоупора, при замене  $h$  на  $(h + 0,5ix)$ , где  $h$  - глубина потока в точке с координатой  $x$ ; кроме того, величина  $h_{cp}$  в выражении коэффициента уравнир.водности "а" заменяется величиной  $(h + 0,5ix)_{cp} / 33/.$

При волнистом водоупоре в расчет должны вводиться глубины, отсчитанные от плоскости, проведенной таким образом, чтобы объем участков водоупорного слоя, расположенных выше этой прямой, равнялся объему участков водоносного слоя, расположенных ниже нее.

## В. Учет величин промежутков высачивания

### 1. Величина промежутка высачивания на откосах котлованов

а. Совершенный незатопленный котлован /35/:

$$h_0 = \frac{q_0}{k} (m + 0,5), \quad (1.33)$$

где  $m$  - заложение откоса выработки ( $m > 1$ ).

б. Затопленный совершенный котлован /32/:

$$\frac{q_0}{k} = \frac{h_0}{m_0 + 0,5} \left[ 1 + \frac{h_K}{h_0 + \alpha_m h_K} \right], \quad (1.34)$$

где  $\alpha_m = \frac{m_n}{2(m_n + 0,5)(m_0 + 0,5)}$ ;  $m_0, m_n$  - заложения надводной и подводной частей откоса.

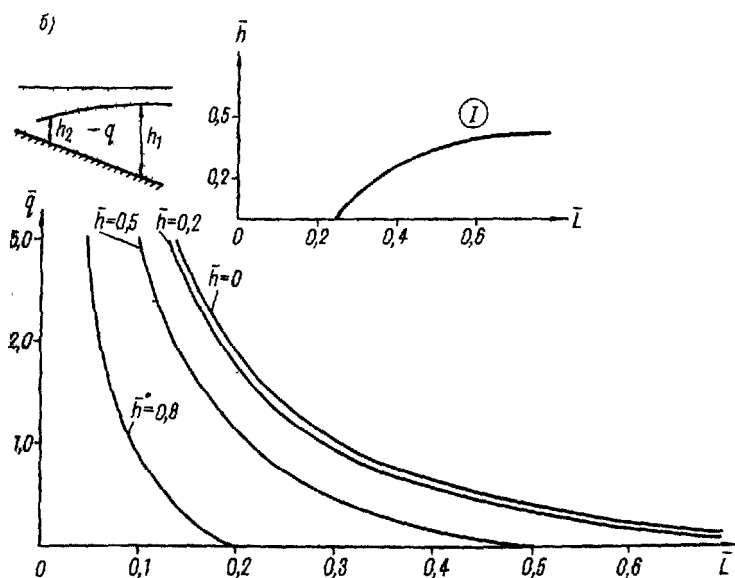
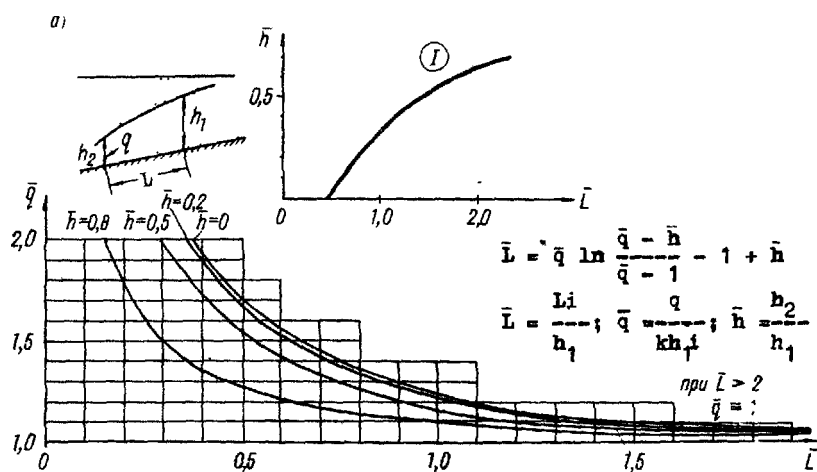


Рис. 8. Графики зависимости приведенного расхода ( $\bar{q}$ ) от приведенного расстояния до области питания ( $\bar{L}$ )  
 а - случай прямого уклона водоупора, б - случай обратного уклона водоупора

в. Несовершенный незатопленный котлован /32/:

$$\frac{q_0}{k} = \frac{h_0}{m} \left( 1 + \frac{T}{h_0 + \frac{0,45}{m} T} \right), \quad (1.35)$$

г. несовершенный затопленный котлован /32/:

$$\frac{q_0}{k} = \frac{h_0}{m_0} \left[ 1 + \frac{h_k}{l_0 + \frac{h_k}{(2 + \frac{1}{m_n}) m_0}} + \frac{T}{h_0 + h_k \frac{m_n}{m_0} + \frac{0,45 T}{m_0}} \right]. \quad (1.36)$$

## 2. Промежуток высачивания на стенках дренажного штрека

Величина промежутка высачивания на стенках дренажного штрека определяется по приближенной формуле /17/ .

$$h_0 = 0,44 \frac{q}{k}, \quad (1.37)$$

где через  $q$  обозначен односторонний приток к выработке.

Если высота штрека меньше величины  $0,44 \frac{q}{k}$ , то вода поступает в штрек по всему его периметру и над штреком имеется "нависание".

## 3. Промежуток высачивания в скважинах

Величина промежутка высачивания ("скачка") в водопонижительных скважинах (в том числе и взаимодействующих) определяется по формуле /12/:

$$h_0 = \sqrt{(0,73 l_0 \frac{\sqrt{\frac{Q_c}{k}}}{r_c} - 0,51) \frac{Q_c}{k} + h_c^2 - h_c}. \quad (1.38)$$

Формула (1.38) не учитывает сопротивления фильтра.

Формула (1.38) применима и в случае несовершенных скважин, но глубина воды в скважине ( $h_c$ ) заменяется величиной заглубления несовершенной скважины в водоносный горизонт. Промежуток высачивания (скачок) нужно учитывать при расчете положения депрессионной кривой; при расчетах дебита следует вводить в расчетные зависимости напор в скважине (котловане) без учета рассчитываемого по формуле (1.38) "скачка" /30/.

## Г. Водозахватная способность скважин

Водозахватная способность скважин  $Q_{вз}$  в некоторых случаях является фактором, лимитирующим их водопонижительный эффект.

Для определения величины  $Q_{вз}$  используется формула /3/:

$$Q_{вз} = 2\pi r_f l_f v_k, \quad (1.39)$$

$$\text{где } v_k = 65 \sqrt[3]{k}, \quad (1.40)$$



$r_{\phi}$  - радиус фильтра (или привинной обсыпки),  
 $l_{\phi}$  - длина рабочей части фильтра.

Ввиду эмпирического характера формулы (1.40), следует, по возможности, определять водозахватную способность на основании опытных данных. Это, в особенности, относится к скважинам, работающим в трещиноватых породах, для которых формула (1.40) вообще неприменима.

#### § 4. Построение сетки движения. Метод "недеформируемых линий тока"

Построение сетки движения сводится, в конечном счете, к определению положения **линий тока** и **линий равных напоров**. Наиболее точно сетка движения может быть получена при моделировании на приборе СГДА, принципы которого подробно описаны в литературе /4/, /22/. Имея картину распределения **линий равного напора**, на контуре котлована или водоопонительной установки выделяют ряд **характерных участков**, от границ которых к области питания проводятся **линии тока** перпендикулярно **линиям равного напора**. Т.о., область фильтрации оказывается разбитой на **характерные ленты тока**; для дальнейшего расчета их нужно привести к **плоским по формулам (1.2) - (1.3)**.

Неустановившийся режим фильтрации также может быть приближенно **учтен** по результатам моделирования на приборе СГДА с помощью принципа "недеформируемых линии тока" /4/. Для этого, прежде всего, строятся **ленты тока** для установившегося режима. Затем принимается, что боковые границы лент во все время движения не меняют своего положения, так что перемещается только внешний контур ленты. Положение этого контура на различные моменты времени определяется по формулам (1.10) - (1.10а), после чего выделенный таким образом участок ленты рассчитывается, как и в случае установившегося движения (подробно об этом - см. гл. III).

#### § 5. Рекомендуемый порядок расчета

Целью каждого фильтрационного расчета является: 1) определение общего притока к карьеру и его изменения во времени; 2) обоснование необходимости тех или иных дренажных мероприятий; 3) обоснование типа, количества и расположения осушительных устройств; 4) определение режима работы запроектированных средств дренажа и его изменений во времени, 5) прогноз изменения **уровней подземных вод** в районе действия системы водоопонизения.

основные исходные данные, необходимые для фильтрационного расчета, таковы:

- 1) сведения об орогидрографии района (реки, озера и другие поверхностные водоемы, балки, овраги и т.п.);
- 2) климатические данные – в первую очередь, количество выпадающих осадков и величина испарения;
- 3) геологическое строение района;
- 4) гидрогеологическое строение района (основные водоносные горизонты, их распространение, уклон водоупора, колебание мощности и напоров и т.д.);
- 5) условия питания и разгрузки водоносных горизонтов и их естественный режим (положение контуров питания и стока, карты гидро – или пьезоизогипс, инфильтрация, перетекание и т.п.);
- 6) данные о коэффициентах фильтрации и уровнепроводности (пьезо – проводности) – по результатам опытных откачек;
- 7) данные о фильтрационных свойствах слабопроницаемых слоев, разделяющих водоносные горизонты ("коэффициенты связи");
- 8) данные о фильтрационных свойствах поверхностных отложений – на тех участках, где возможна дополнительная инфильтрация;
- 9) инженерно-геологическая характеристика обводненных пород;
- 10) сведения о горных работах (расположение карьера, применяемое горное оборудование, график ведения горных работ и т.д.).

В общем случае расчет рекомендуется проводить в следующем порядке.

1. Определяются типовая схема области фильтрации и условия на внешних и внутренних границах пласта (§ 1). В сложных граничных условиях строится (приблизленно) сетка движения; для этого предполагается, что подземные воды дренируются только самим карьером. Намечаются характерные ленты тока.

2. Осуществляется, по возможности, схематизация условий фильтрации и определяются основные расчетные параметры для каждого водоносного горизонта (§§ 2,3):

- а) мощность и напор горизонта или глубина потока (для безнапорных горизонтов); уклон водоупора;
- б) расстояния до областей питания и стока;

- в) коэффициенты фильтрации и уровнепроводности (пьезопроводности);
- г) заданные понижения (для несовершенных котлованов) или заданные величины допустимого "проскока" к откосу (для совершенных котлованов);
- д) заданное время, в течение которого должен быть достигнут требуемый эффект.

В сложных условиях расчетные данные определяются для каждой из выделенных лент тока.

Дальнейший расчет проводится для каждого обособленного водонесного горизонта в отдельности. Если те или иные средства осушения работают на несколько горизонтов, то это учитывается дополнительными расчетами.

3. Определяется общий приток к карьере, распределение притоков по участкам и их изменение во времени. При этом для первых моментов времени расчет должен вестись по формулам неустановившегося движения (гл. III). Примерное время, необходимое для достижения установившегося режима в случае областей с фиксированными контурами питания, определяется согласно формулам (1.12)–(1.13). Для безнапорных горизонтов с весьма удаленными границами питания неустановившийся режим может иметь место в течение всего периода эксплуатации карьера. Для напорных горизонтов упругий режим имеет смысл обычно учитывать лишь для пластов больших размеров (более 5 – 7 км).

4. Полученные величины притоков оцениваются с точки зрения их влияния на условия ведения горных работ и устойчивость откосов (ч. 1). Если заградительного дренажа не требуется, то расчет заканчивается определением пропускной способности открытых прибортовых канав, а также параметров горизонтального прибортового дренажа – в случае, когда он применяется.

Кроме того, проводится расчет уровней в характерных точках, в тех случаях, когда в этом имеется необходимость.

Если проверка покажет необходимость заградительного дренажа, то проводится дальнейший расчет с целью выявления оптимальной схемы такого дренажа. Для этого намечается несколько возможных рациональных вариантов (см. ч. 1), каждый из которых рассчитывается отдельно.

5. Расчет притоков к открытым траншеям, дренажным штрекам, горизонтальным скважинам, задаваемым из выработанного пространства, иглофильтрам проводится по формулам гл. II и гл. III.

6. Более подробно следует остановиться на порядке расчета контурных систем водопонижительных скважин, оборудованных насосами, а также вертикальных (и наклонных) поглощающих скважин, скважных фильтров и т.п. В этих случаях сначала проводится приближенный расчет, а затем - уточняющий.

а. Приближенный расчет скважин, оборудованных насосами.

В случае несовершенных котлованов, разрабатываемых "всухую", необходимое число скважин  $n_y$  на участке определяется по формуле:

$$n_y = \frac{Q_y}{Q_n}, \quad (1.41)$$

где  $Q_n$  - производительность насоса,

$Q_y$  - общая величина притока к участку (см.п.8).

При этом следует помнить об условии  $h_c \geq 0$ , выполнение которого проверяется с помощью формулы (1.18) при  $h_\phi = T$ .

В случае совершенных котлованов может быть рекомендован график (рис.9) зависимости  $\delta = f(\sigma, \bar{l}_2)$ , где  $\delta$  - коэффициент заслона, определяемый формулой:

$$\delta = 1 - \frac{q_0}{q}, \quad (1.42)$$

где  $q$  и  $q_0$  - удельные притоки на 1 пог.м.откоса при отсутствии дренажного ряда и при работе его. Для использования графика предварительно определяется допустимый расход потока ( $q_0^0$ ), притекающего к откосу (исходя из допустимой величины языка оплывания или иных требований - см.ч.1) или к внутреннему дренажному контуру - если он существует (исходя из его оптимальной производительности). Затем, задаваясь величиной

$$\delta^0 = 1 - \frac{q_0^0}{q}, \quad (1.42a)$$

по графику можно определить требуемую величину  $\sigma$ , которая должна удовлетворять условию:  $\delta(\sigma, \bar{l}_2) \geq \delta^0$ . Пример расчета приведен в приложении № 3.

Отметим, что при выборе насосного оборудования следует помнить об условии  $Q_c \leq Q_{вз}$  (см.1.39).

б. Приближенный расчет поглощающих скважин, сквозных фильтров и т.п.

В случае несовершенных котлованов следует исходить из условия

$$h_\phi = T,$$

где величина  $h_\phi$  определяется по (1.18) при  $Q_c = \frac{Q_y}{n}$ .

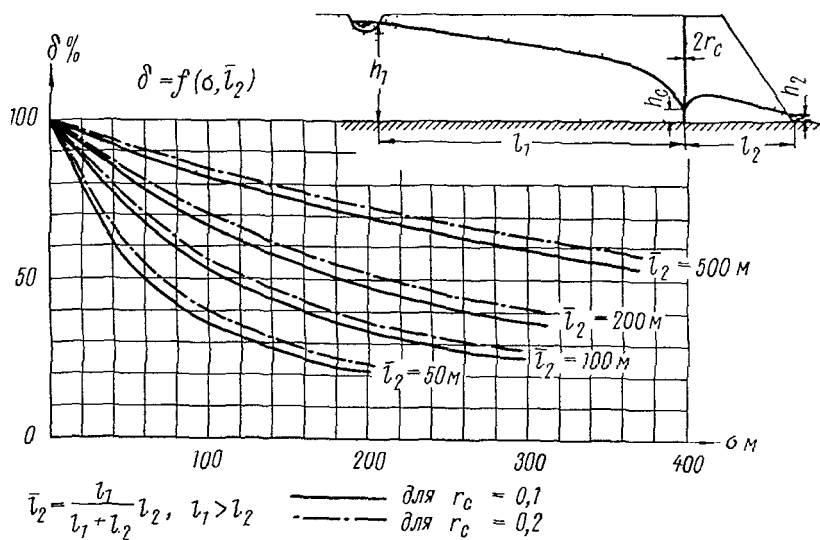


Рис.9. График для определения расстояния между скважинами

Примечание. График построен для случая плоского одномерного потока; в прочих случаях следует предварительно осуществить приведение согласно §2 п.А.

для совершенных котлованов расчет аналогичен случаю скважин, оборудованных насосами.

На основании прикидочных расчетов подбирается расстановка скважин и мощность насосного оборудования, после чего проводится уточняющий расчет по формулам § 2 гл. II и § 2 гл. III.

## Г л а в а П.

### УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ФИЛЬТРАЦИИ

#### § 1. Расчет фильтрации к открытым горным выработкам и к дренажным штрекам х)

##### А. Р а с ч е т ф и л ь т р а ц и и к о д и н о ч н ы м в ы р а б о т к а м

1. Общие водопритоки к открытым горным выработкам в типовых условиях (гл. I, § 1) можно определять по формуле "большого колодца" (см. формулу (1.5)).

2. Для определения притоков к линейно вытянутым выработкам (траншеям, штрекам), расположенным вблизи контура питания и ориентированным параллельно ему, может использоваться формула (1.1) при выполнении условия /21/.

$$1) \frac{d}{b} > 10 \quad \text{и} \quad 2) \frac{L}{d} < 0,5.$$

Расчет по формуле (1.1) справедлив только для бортов линейных выработок, обращенных к области питания.

3. Для определения общих водопритоков к выработке в сложных условиях, а также для выяснения изменения величины водопритоков по периметру выработки и построения депрессионных (пъезометрических) кривых, расчет следует производить по характерным лентам тока (см. гл. I, § 4). Для горизонтов со сложными условиями питания и стока, для которых выражения R не получены, такой расчет является обязательным. Расчет водопритоков по ленте тока, приведенной к плоской (см. гл. I, § 2), производится по формуле (1.1). Пример расчета приведен в приложении № 3.

х) Расчет фильтрации к дренажным штрекам, в основном, может вестись по приводимым в настоящем параграфе формулам для линейных (вытянутых) открытых выработок; некоторые особенности отражены в п. Д настоящего параграфа.

## Б. Взаимодействие горных выработок

1. Для определения общих притоков к взаимодействующим горным выработкам (приведенным к "большим колодцам") в типовых условиях решается система уравнений /1/:

$$Q'_1 \lg R_1 + Q'_2 \lg \frac{R_2}{\rho_{1-2}} + Q'_3 \lg \frac{R_3}{\rho_{1-3}} + \dots + Q'_n \lg \frac{R_n}{\rho_{1-n}} = D_1 + Q'_1 \lg r_{k_1},$$

$$Q'_1 \lg \frac{R_1}{\rho_{n-1}} + Q'_2 \lg \frac{R_2}{\rho_{n-2}} + Q'_3 \lg \frac{R_3}{\rho_{n-3}} + \dots + Q'_n \lg R_n = D_n + Q'_n \lg r_{k_n},$$

где  $\rho_{i-k}$  - расстояние между  $i$ - и  $k$ -выработкой;  $D_i = 1,36K(2h - S_i)$ ,

$R_i$  - расчетный радиус влияния для  $i$ -ой выработки.

Для определения уровня в любой точке может быть использована формула /1/:

$$h = \sqrt{h_0^2 - \frac{0,733}{K} (Q'_1 \lg \frac{R_1}{\rho_1} + \dots + Q'_n \lg \frac{R_n}{\rho_n})}, \quad (II.2)$$

где  $\rho_i$  - расстояние от  $i$ -ой выработки до расчетной точки.

2. Расчет взаимодействующих линейных (вытянутых) параллельных выработок, уровень воды в которых находится выше водоупора (например, несовершенные выработки), проводится путем составления и решения соответствующей системы балансовых соотношений (см. по этому поводу гл. 1, § 2, Ж и приложение № 2).

3. Определение водопритоков к взаимодействующим горным выработкам и уровней в зоне их влияния в сложных условиях осуществляется путем моделирования на приборе ЭГДА и последующего расчета водопритоков по лентам тока.

## В. Определение притоков при питании водоносных горизонтов за счет инфильтрации

1. Если инфильтрация служит единственным (или основным) источником питания подземных вод, то для одиночных выработок она может приближенно учитываться соответствующим выражением радиуса влияния (формулы (1.6), (1.6а)).

Особый интерес представляет учет инфильтрации при расчете систематического дренажа основания отвалов параллельными канавами. Расстояние между параллельными совершенными канавами определяется по формуле /17/:

$$o = 2\sqrt{\frac{k}{w} (h_{\max}^2 - h_2^2)} \quad (II.3)$$

где  $w$  - интенсивность просачивания атмосферных вод (устанавливается опытным путем); для приближенных расчетов:

$w = 0,001 - 0,002$  м/сутки - в легких суглинках и супесях;

$w = 0,002 - 0,005$  - в песках (для средней полосы Советского Союза) /2/;

$h_{max}$  - максимально допустимое превышение уровня над "водоупором";

$h_2$  - превышение уровня в канаве над "водоупором".

Расстояние между двумя несовершенными канавами (рис.10) определяется из формулы (II.3) при подстановке вместо величины  $h_2$  величины  $h_{\phi}$ , определяемой по формуле (1.25) при  $q = w\sigma$ .

2. Если инфильтрация служит источником дополнительного подпитывания водоносного горизонта по всей площади его (между областью питания и горной выработкой), то она может быть учтена прибавлением к удельным расходам, рассчитанным без учета инфильтрации, величины /22/ :

$$q'_d = w \frac{L}{2} \quad (II.4)$$

3. Если инфильтрация имеет место вдоль некоторого линейного контура (например, река с заколымачиваемым руслом), параллельного контуру дренажа, то ее можно учесть, прибавляя к расчетным удельным притокам величину:

$$q'_d = w \frac{l_1}{l_1 + l_2} \quad (II.4a)$$

где  $l_1, l_2$  - расстояния от линейного контура до контуров питания и дренажа.

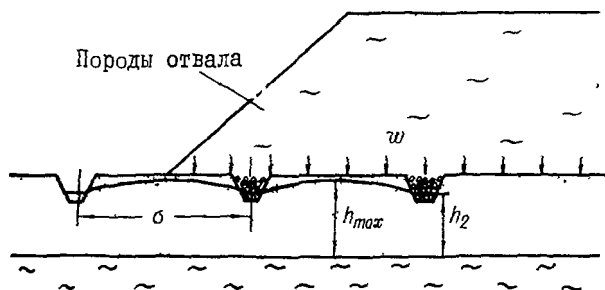


Рис. 10. Схема к расчету систематического дренажа отвалов



4. Если имеет место очаговая (локальная) инфильтрация, то ее можно учесть, помещая в центре очага инфильтрации фиктивную нагнетательную скважину с постоянным дебитом  $Q = -wF$  ( $F$  - площадь участка инфильтрации). В дальнейшем расчет ведется по формулам для скважин с постоянным дебитом (см. гл. II, § 2 и гл. III, § 2).

### Г. Определение притоков при питании (или разгрузке) водоносных горизонтов за счет "перетекания"

Наибольший интерес представляет случай, когда открытые горные выработки вскрывают горизонт, который питается (или разгружается) за счет гидравлической связи с другим, более водообильным, горизонтом, залегающим ниже или выше рассматриваемого и отделенным от него "водоупором", причем уровни водообильного горизонта не зависят от "перетекания". Такое предположение справедливо при соотношении проводимостей ( $k_{м}$ ), превышающем (20÷40). При этом возможны следующие типовые схемы:

а) если поверхность уровня водообильного питающего горизонта может считаться горизонтальной (рис. 11а), то "перетекание" в случае неограниченного пласта учитывается в выражении радиуса влияния (см. гл. I, § 2, п. В);

б) если уровень водообильного горизонта-переменный, а рассматриваемый горизонт-неограниченный (рис. 11б), то осесимметричный приток к выработке, приведенной к "большому колодцу", рассчитывается по формуле /22/:

$$Q = 2\pi mk \left[ (\Delta H_2 - J_{кр} m_0) \sqrt{G} r_k \frac{k_1(r_k \sqrt{G})}{k_0(r_k \sqrt{G})} + A_0 \right], \quad (II.5)$$

где  $\Delta H_2$  - разность уровней горизонтов на контуре дренажа;

$J_{кр}$  - начальный градиент для разделяющего "водоупора";

$k_0(x)$ ,  $k_1(x)$  - функции Бесселя второго рода /38/;

$$G = \frac{k_B}{k_{м} m_B}, \quad A_0 = \frac{Q_{п}}{2\pi k_{п} m_{п}},$$

$Q_{п}$  - расход, поступающий в выработку из водообильного горизонта;

индексы "в" и "п" относятся, соответственно, к разделяющему "водоупору" и водообильному горизонту.

Плоский одномерный поток в аналогичных условиях рассчитывается по формуле /22/:

$$q = km \left[ \frac{h_{1п} - h_{2п}}{L} + \sqrt{G} (\Delta H_2 - J_{кр} m_n) \right], \quad (II.6)$$

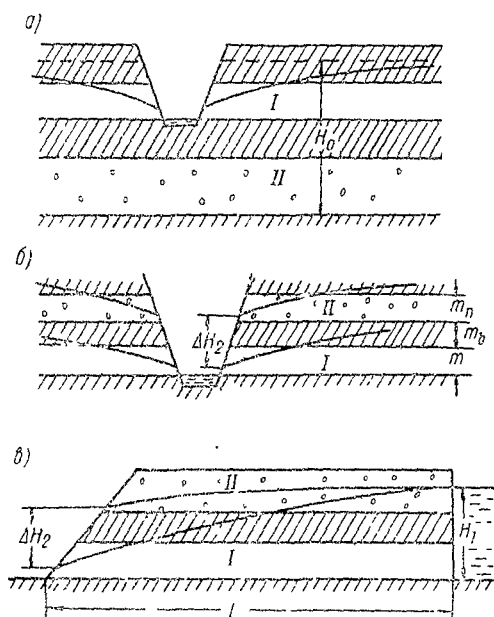


Рис. 11. Схемы к расчету "перетекания"

г) приток в котлован, проинденный вблизи реки или непроницаемого прямолинейного контура, при постоянном уровне питающего горизонта определяется формулой /6/:

$$Q = \frac{2\pi km S}{k_0(r_k \sqrt{G}) \pm k_0(2R_k \sqrt{G})} \quad (11.9)$$

причем знак (+) берется в случае непроницаемого контура, а знак (-) - в случае контура питания;

д) для безнапорных водоносных горизонтов в аналогичных условиях применимы, с некоторой долей приближения, формулы (11.5) - (11.9), при замене в них величины "m" на  $k_{cp} = \frac{k_1 + k_2}{2}$ .

е) в тех случаях, когда проводимости (km) обоих горизонтов соизмеримы, "перетекание" существенно сказывается на уровнях и расходах обоих взаимодействующих горизонтов и приведенные выше формулы неприменимы. Решение задачи тогда значительно усложняется. Для наиболее интересного для нас случая, изображенного на рис. 12, условие полного устранения выхода воды на откос в пределах верхнего горизонта записывается в виде /34/:

в) ограниченный напорный одномерный плоский поток с постоянным уровнем на внешней границе рассчитывается по формуле /22/:

$$q = km [A_{пл} + \sqrt{G}(C_2 - C_1)] \quad (П.7)$$

где  $C_2$  и  $C_1$  определяются из системы:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = -(\Delta H_2 - J_{кр} m_B) \\ C_1 e^{-L\sqrt{G}} + C_2 e^{L\sqrt{G}} = -(\Delta H_1 - J_{кр} m_B) \end{cases}$$

$L$  - расстояние между контуром дренажа и контуром питания,

$\Delta H_1$  - разность уровней на контуре питания,

$$A_{пл} = \frac{k_{1п} - k_{2п}}{L}$$

При питании обоих горизонтов из одного источника (рис. 11в) и при  $J_{кр} = 0$ :

$$q = km (A_{пл} - \sqrt{G} \Delta H_2 \frac{e^{\frac{2L\sqrt{G}}{-1}} + 1}{e^{\frac{2L\sqrt{G}}{-1}} - 1}) \quad (11.8)$$

$$m_2 + m_3 < \frac{8k_3 m_1 m_2 m_3}{k_2 L^2} (\sqrt{1 + \varepsilon^2} - \varepsilon), \quad (II.10)$$

где  $\varepsilon = 1 + 2 \frac{k_3 m_3}{k_1 m_1}$ .

В этом случае расход нижнего горизонта определяется формулой:

$$q = \frac{k_3 m_3 (m_1 + m_2 + m_3) + 0,5 k_1 m_1^2}{L}. \quad (II.11)$$

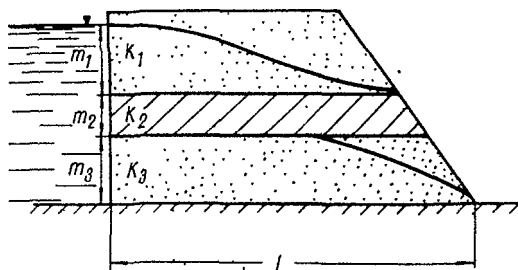
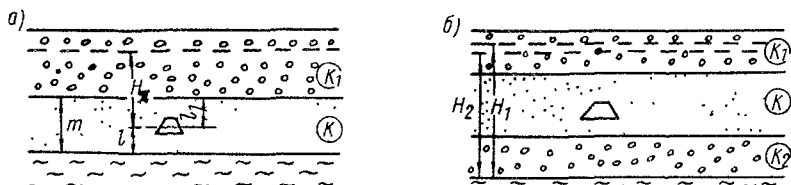


Рис. 12. Схема к расчету фильтрации в случае трехслойного сложения откоса

#### Д. Особенности расчета фильтрации к дренажным штрекам

Если над дренажным штреком отсутствует "нависание" (см. I.37), то он может рассчитываться аналогично траншее (соответственно, совершенной и несовершенной).

Если же "нависание" имеется, то расчетная схема требует изменения. Это относится, главным образом, к тому случаю, когда штрек проходит в слое, проницаемость которого меньше, чем у перекрывающего слоя. (рис. 13). Для этого случая можно дать следующие общие рекомендации.



☉ - галечник, ☐ - мелкозернистый песок, ~ - глина

Рис. 13. Схемы к расчету притоков к дренажному штреку

1. При выполнении соотношения  $\frac{s_1}{k} > 20+30$  штрек практически не оказывает дренажного эффекта на верхний горизонт. Притоки к штреку можно рассчитать по формулам /4/:

$$q = \frac{kH_d}{0,371g \left[ \lg \left( \frac{\pi}{8} \frac{4l-d}{m} \right) \lg \left( \frac{\pi}{8} \cdot \frac{d}{m} \right) \right]} \quad (11.12)$$

- для случая, изображенного на рис.13а;

$$q = \frac{k[(H_1 - H_2) \frac{l}{m} + H_2]}{0,37 \lg \left( \frac{4}{\pi} \frac{m}{d} \cos \frac{\pi(2l-m)}{2m} \right)} \quad (11.13)$$

- для случая, изображенного на рис.13б (d - приведенный диаметр штрека).

2. При  $\frac{k_1}{k} < 20+30$  рекомендуется использовать моделирование на приборе ИГДА. Для сугубо приближенных расчетов можно вводить осредненный коэффициент фильтрации (гл.1, § 2, п.3), принимая напор на контуре штрека с учетом "нависания" (формула 1.57). Расчет в этом случае ведется последовательным приближением.

## § 2. Расчет водопонижительных скважин

При расчете водопонижительных скважин может считаться заданным либо их дебит, либо понижение в них.

Дебит скважины может быть принят равным производительности насоса при соблюдении условий  $Q_n \leq Q_c^m$  и  $Q_n \leq Q_{вз}$ ,

где  $Q_c^m$  - расчетный дебит скважины при максимально возможном понижении (см. гл.1, § 1, п.А).

Во всех прочих случаях следует считать заданным напор в скважине, определяемый максимально возможным понижением. Напор считается заданным и для всех видов безнасосных скважин (кроме случая, когда  $Q_c^m \geq Q_{вз}$ ).

### А. Расчет скважин в типовых условиях

1. При работе одиночной скважины с заданным понижением определение ее дебита производится по формуле /35/:

$$Q_c = \frac{k(h_{oc}^2 - h_c^2)}{2f_c^0}, \quad (11.14)$$

где  $f_c^0$  - функция понижения, характеризующая эффективность работы скважины, зависящая от условия питания и дренажа водоносного горизонта;

$h_{oc}$  и  $h_c$  - соответственно, статический и динамический уровни в скважине.

Для определения понижения в самой скважине при заданном ее дебите также употребляется формула (II.14). Для определения понижения в любой точке пласта при работе скважины с известным дебитом употребляется формула:

$$h = \sqrt{h_0^2 - \frac{2Q_c}{k} f_c}, \quad (II.15)$$

где  $f_c$  - функция понижения для данной точки.

Значения функций  $f_c^0$  и  $f_c$  приведены в табл.3 /35/.

## 2. Расчет системы произвольно расположенных скважин.

При заданных дебитах скважин расчет понижения в любой точке проводится по формуле /35/:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2}{k} \sum_{i=1}^n Q_{ci} f_{ci}, \quad (II.16)$$

где  $Q_{ci}$  - дебит  $i$ -ой скважины,

$f_{ci}$  - функция понижения от действия скважины номер  $i$  (определяется по табл.3)

В частном случае равнодебитных скважин

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2Q_c}{k} \sum_{i=1}^n f_{ci}. \quad (II.17)$$

При заданных уровнях в скважинах расчет их дебитов осуществляется путем решения системы уравнений:

$$\sum_{i=1}^n Q_{ci} f_{ci}^0 = \frac{k(h_{oci}^2 - h_{ci}^2)}{2}. \quad (II.18)$$

## 3. Расчет контурных систем скважин.

Такой расчет проще всего осуществляется с помощью построения лент тока (см. ниже - п.Б); можно пользоваться и аналитической зависимостью /35/:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2}{k} \sum_{i=1}^p Q_{yi} f_{yi}, \quad (II.19)$$

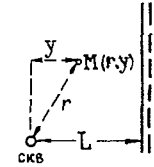
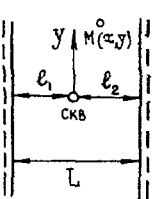
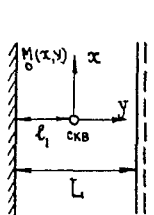
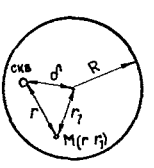
где  $p$  - число характерных участков контура (в пределах каждого из них расход скважин и расстояния между ними могут считаться практически одинаковыми),  $Q_{yi}$  - суммарный расход скважин  $i$ -го участка,

$f_{yi}$  - функция понижения от действия  $i$ -го участка.

В общем виде функция понижения от действия ограниченного прямолинейного ряда равнодебитных и равноудаленных друг от друга скважин выражается формулой /12/:

$$f_y = f_c - \Delta f, \quad (II.20)$$

Таблица 3

Условия питания и стока водоносного горизонта	С х е м а	$f_c^o$	$f_c$ (в точке M)
1. В полуограниченном пласте (линейная граница с постоянным напором)		$f_c^o = 0,367 \lg \frac{2L}{r_c}$	$f_c = 0,367 \lg \frac{\sqrt{4L^2 - 4Ly + r^2}}{r}$
2. Между двумя границами с постоянным напором		$f_c^o = 0,367 \lg \left[ \frac{2L}{\pi r_c} \cos \frac{\pi(l_1 - l_2)}{2L} \right]$	$f_c = \theta(\bar{x}, 2\bar{y} + \bar{y}) - \theta(\bar{x}, \bar{y})$ $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{L}; \bar{x} = \frac{x}{L}; \bar{y} = \frac{y}{L}$ (см. рис. I4)
3. Между областью питания и непроницаемой границей		$f_c^o = 0,367 \lg \left[ \frac{4L}{\pi r_c} \operatorname{ctg} \frac{\pi l_1}{2L} \right]$	$f_c = \theta(\bar{x}, \bar{l}_1 + \bar{y}) + \theta(\bar{x},  \bar{l}_1 - \bar{y} )$ $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{L}; \bar{x} = \frac{x}{L}; \bar{y} = \frac{y}{L}$ (см. рис. I4)
4. В круговом пласте с постоянным напором на контуре		$f_c^o = 0,367 \lg \frac{R^2 - r^2}{R r_c}$	$f_c = 0,367 \lg \frac{\sqrt{R^2 + \frac{r^2}{R^2} - \delta^2 + r^2 - r_1^2}}{r}$

$f_c$  - функция понижения от действия скважины, расположенной в центре ряда (определяется по табл.3),

$$\Delta f = 0,367 \lg \frac{r_{эф}}{r}, \quad (II.21)$$

$r$  - расстояние от середины линии до точки, в которой определяется понижение,

$r_{эф}$  - расчетное расстояние от линии до точки (определяется по графику или по таблице - см.рис.15).

Если требуется найти понижение в какой-либо характерной скважине ряда, то вместо формулы (II.20) следует пользоваться формулой:

$$f_y = f_c - \Delta f + \frac{1}{n} \Phi_k, \quad (II.22)$$

где  $\Phi_k$  определяется по номограмме (рис.3),  $n$  - число скважин ряда.

Формула (II.20) применима при условии, что участок контура удален от границ области фильтрации на расстояние, большее половины его длины.

Особо отметим следующие важные частные случаи:

а) бесконечный прямолинейный ряд равнодебитных скважин вблизи прямолинейного контура питания (стока), параллельного ряду (например, вблизи реки):

$$Q_c = \frac{0,5 \cdot k (h_0^2 - h_c^2)}{0,367 \lg \frac{\sigma}{\pi d_c} + \frac{L}{\sigma}}; \quad (II.23)$$

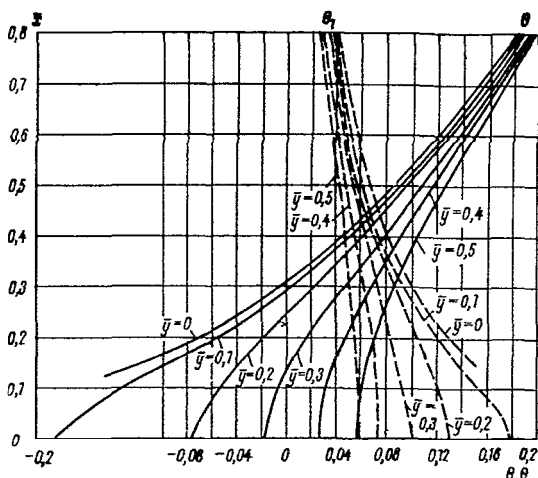
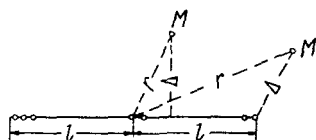


Рис. 14.



$$\bar{r}_{\text{exp}} = \frac{r_{\text{exp}}}{l}, \quad \bar{r} - \bar{\Delta} = \frac{r - \Delta}{l}, \quad \bar{\Delta} = \frac{\Delta}{l}$$

а) при  $\bar{\Delta} > 3$   $r_{\text{exp}} = r$ ,

б) при  $1 \leq \bar{\Delta} < 3$  величины

$\bar{r}_{\text{exp}} = \frac{r_{\text{exp}}}{r}$  находятся по таблице

$\bar{\Delta}$	$r - \Delta$	0	0,25	0,5	0,75	1
1		1,13	1,03	1,01	0,98	0,96
2		1,03	1,02	1	0,99	0,96
3		1,01	1,01	1	1	0,99

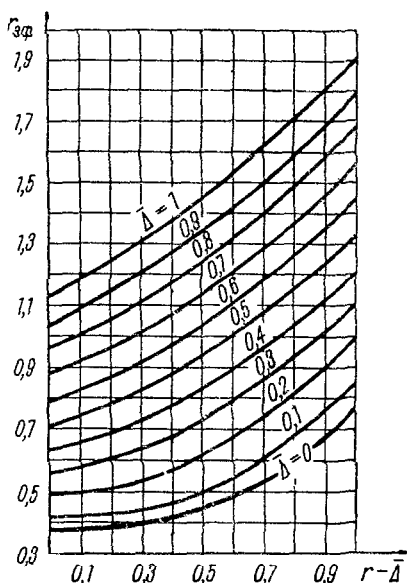


Рис.15. Схема к определению расчетного расстояния

б) то же - между двумя параллельными границами с постоянными напорами (ряд между контуром питания и совершенным котлованом):

$$Q_c = \frac{0,5 k (h_0^2 - h_c^2)}{0,367 \lg \frac{\sigma}{\pi d_c} + \frac{l_1 l_2}{\sigma (l_1 + l_2)}}; \quad (11.24)$$

в) круговой контур равнодебитных скважин, оконтуривающих "сухой" несовершенный котлован:

$$Q_c = \frac{0,5 k (h_0^2 - h_c^2)}{0,367 \lg \left( \frac{R^n}{n r_k^{n-1} r_c} \right)} \quad (11.25)$$

Во всех трех случаях для определения понижения в любой точке целесообразно предварительно осуществлять замену дренажного контура фиктивной совершенной траншеи, в соответствии с формулами (1.18) - (1.19).

## Б. Расчет систем скважин в сложных условиях питания

Расчет скважин в сложных условиях (см. гл.1, § 1, п.Б) должен производиться на основании результатов моделирования на приборе ЭГДА/86/.



Вначале строится "сетка движения" (гл.1, § 4) без учета работы скважин, т.е. определяются "естественные" напоры по всей области фильтрации. Затем определяются функции понижения для скважин; при этом каждая из них должна рассматриваться (моделироваться) как отдельный сток - с помощью электрода. Так как диаметр скважины в масштабе модели оказывается весьма малым, целесообразно моделировать ее электродом большего диаметра. Для выполнения требований подобия к этому электроду должно последовательно присоединяться дополнительное сопротивление в виде прямоугольного листа электропроводной бумаги, из которой изготовлена модель; при этом должно выполняться соотношение:

$$\frac{l_c}{b_c} = 0,367 \lg \frac{d_3}{d_{cm}} \quad (II.26)$$

где  $d_3$  - диаметр электрода;

$d_{cm}$  - диаметр скважины в масштабе модели;

$l_c, b_c$  - длина и ширина дополнительного листа бумаги.

Для контурных систем скважин можно обойтись без дополнительного сопротивления, если увеличить расстояние между скважинами до величины  $\delta'$ , определяемой из соотношения:

$$\sigma \lg \frac{\delta}{\pi d_c} = \sigma' \lg \frac{\delta'}{\pi d_3} \quad (II.27)$$

Наконец, к модели (электроду) последовательно присоединяется эталонный прямоугольный лист электропроводной бумаги произвольного размера ( $l_3 \times b_3$ ) (см.рис.16). После этого к эталону подводится потенциал 100%, а ко всем границам области фильтрации с постоянным напором -

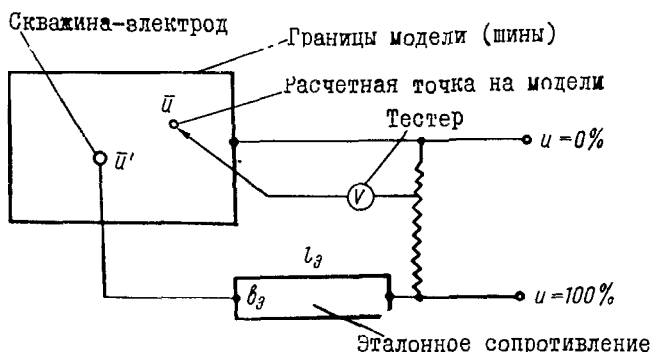


Рис. 16. Схема модели ЭГДА для определения функции понижения

- потенциал  $U_c$  и замеряются относительные потенциалы в расчетной точке ( $\bar{U}$ ) и на контакте модели с эталонным листом ( $\bar{U}'$ ). Функция понижения  $f_c$  от действия скважины в данной расчетной точке определяется по формуле /36/:

$$f_c = \frac{\bar{U}}{1 - \bar{U}'} \cdot \frac{l_3}{b_3} \quad (II.28)$$

Для определения функции понижения в самой скважине  $f_c^0$  следует замерить относительные потенциалы в 8 точках, отстоящих от электрода на одинаковом (по кругу) расстоянии  $r_p$  (на модели следует принимать  $r_p = 2+3$  см); после чего величина  $f_c^0$  определяется формулой /36/:

$$f_c^0 = \frac{\bar{U}_{cp}}{1 - \bar{U}'} \cdot \frac{l_3}{b_3} - 0,367 \lg \frac{r_p}{r_3} \quad (II.29)$$

где  $\bar{U}_{cp}$  - среднее из 8 замеров.

После определения функции понижения расчет проводится по формулам типа (II.14) - (II.15). Для контурных систем с большим числом скважин такой расчет связан с трудоемкими операциями. Поэтому в таких случаях целесообразно вести расчет по лентам тока, построенным с помощью моделирования на приборе ЭГДА (см.гл.I, § 4).

Для построения лент тока отметка уровней на участке дренажного контура ориентировочно принимается равной: а) отметке дна котлована - для несовершенных "сухих" котлованов, б) отметке водоупора - для совершенных незатопленных котлованов, в) отметке воды в котловане - для затопленных котлованов.

Расчет в пределах каждой ленты тока, предварительно приведенной к плоской (гл.1, § 2, п.А), проводится по соответствующим формулам для бесконечных рядов скважин в полосообразном пласте, приведенным ниже. После такого расчета по формулам (1.18) или (1.19) определяются уровни по контуру скважин, затем вновь производится построение лент тока при этих уточненных уровнях и расчет повторяется заново. Обычно второго приближения оказывается достаточно для получения надежного результата.

Ниже приводятся основные формулы для расчета прямолинейных рядов скважин в полосообразном пласте, которые используются при расчетах в пределах ленты тока.

### 1. Несовершенный незатопленный котлован

а. Расчет участка линейной водопонижительной установки (рис.17а) ведется в следующей последовательности.

1) Определяется требуемый уровень на линии контура  $h_{\phi}$ , исходя

из необходимого понижения по площади котлована, для этого используется формула:

$$\frac{T^2 - h_{\Phi}^2}{x'} = \frac{h_1'^2 - h_{\Phi}^2}{L'} \quad (II.30)$$

2) Определяется дебит скважины:

$$Q_c = \frac{Kc}{2} \left( \frac{h_1'^2 - h_{\Phi}^2}{L} + \frac{h_1''^2 - h_{\Phi}^2}{L''} \right) \quad (II.31)$$

Если задаваться расходом скважин, то из формулы (II.31) определяется требуемое расстояние между ними.

3) Исходя из значений  $h_{\Phi}$  и  $Q_c$  можно определить уровень в скважине 1 по формуле (1.18).

Если  $h_c < 0$ , то необходимо либо уменьшить расстояние между скважинами, либо проводить понижение контурной системой скважин.

4) Расчет уровней в пределах лент производится по формуле

$$h_x^2 = h_1^2 - (h_1^2 - h_{\Phi}^2) \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \quad (II.32)$$

б. В том случае, когда скважины располагаются с обеих сторон котлована (рис. 17б), величина  $h_{\Phi}$  принимается соответствующей отметке дна котлована в пределах ленты (Т).

Для расчета дебита в этом случае употребляется формула.

$$Q_c = \frac{Kc}{2} \frac{h_1^2 - T^2}{L} \quad (II.33)$$

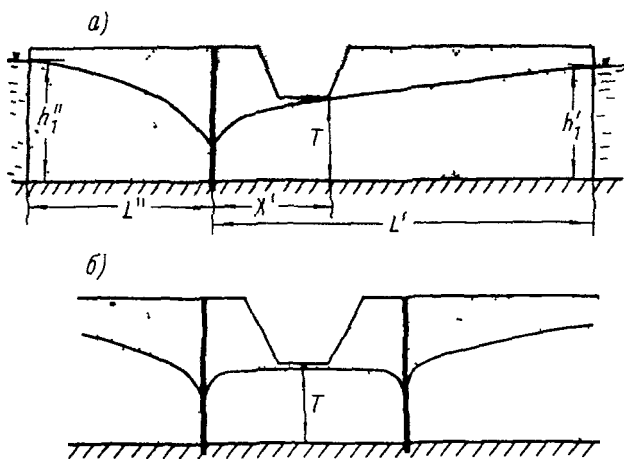


Рис. 17. Схемы к расчету линейных систем скважин вблизи несовершенных котлованов

для расчета уровней вне контура — формула (II.32) при  $h_c = T$ .

Если  $h_c < 0$  ( $h_c$  получаем из (1.18) при  $h_c = T$ ), то следует либо уменьшить расстояние между скважинами, либо проводить водопонижение двухконтурной системой (например, ряд водопонижительных скважин в сочетании с рядом иглофильтров).

## 2. Совершенный котлован<sup>х)</sup>

а. Расчет однорядной контурной установки (рис.18) проводится по формуле /12/:

$$Q_c = \frac{k}{2} \cdot \frac{\left[ \frac{l_2}{L} (h_1^2 - h_2^2) + h_2^2 - h_c^2 \right]}{\frac{l_1 l_2}{\delta L} + 0,367 \lg \frac{\delta}{2\pi r_c}} \quad (\text{II.34})$$

Удельный расход потока, выходящего на откос, определяется формулой /12/:

$$q_0 = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} - Q_c \frac{l_1}{\delta L} \quad (\text{II.35})$$

Расчет ведется в следующем порядке.

1) Задаваясь различными величинами  $\delta$ , определяем  $Q_c$  по формуле (II.34); строим график  $Q_c = f(\delta)$ .

2) С графика  $Q_c = f(\delta)$  снимается несколько парных значений величин  $Q_c$  и  $\delta$  и строится график зависимости  $q_0 = f_1(\delta)$ , где  $q_0$  вычисляется по формуле (II.35).

3) Исходя из допустимых с точки зрения фильтрационных деформаций значений  $q_0$  или из принятого коэффициента вала (см. гл.1, § 5), пользуясь графиком  $q_0 = f_1(\delta)$ , находим требуемую величину  $\delta$ , а затем по графику  $Q_c = f(\delta)$  подбираем соответствующее значение  $Q_c$ .

б. В случае двухрядной схемы (рис.19) обычно заданными являются:  $\sigma''$  и  $h_c''$  — для внутреннего ряда;  $Q_c'$  и  $h_c'$  — для внешнего ряда.

Следует определить  $Q_c''$  и  $\sigma'$  по формулам /12/:

$$\sigma' = 2 \frac{Q_c'}{k} \cdot \frac{l_1}{L} \frac{l_2 + l_3 - A l_1}{h_1^2 \frac{l_2}{L} (1+A) + h_c''^2 (1-A \frac{l_2}{l_3}) - h_c'^2 - \frac{2Q_c'}{k} \Phi_k'} \quad (\text{II.36})$$

$$\text{где } A = \frac{l_3}{l_1 + l_2 + \sigma'' \frac{L}{l_3} \Phi_k''},$$

$$Q_c'' = \frac{0,5k (h_1^2 - h_c''^2 \frac{L}{l_3}) - \frac{Q_c'}{\sigma'} l_1}{l_3} A \sigma'', \quad (\text{II.37})$$

50 х) Сюда же относится случай несовершенного затопленного котлована

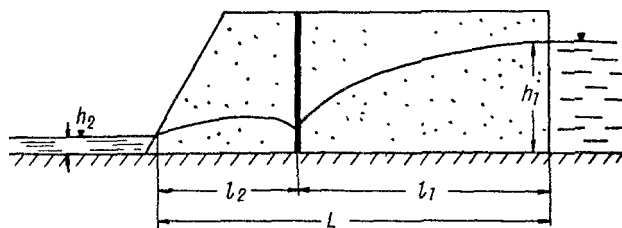


Рис. 18. Схема к расчету контурной установки скважин вблизи совершенного котлована

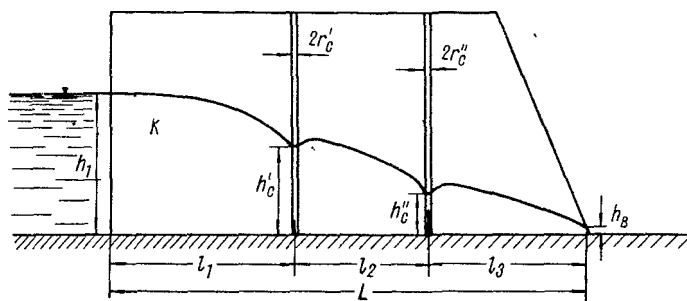


Рис. 19. Схема к расчету двухрядной установки скважин вблизи совершенного котлована

где  $\Phi'_k = 0,367 l_0 \frac{\delta'}{2\pi r'_c}$ ,  $\Phi''_k = 0,367 l_0 \frac{\delta''}{2\pi r''_c}$  (см. рис.3).

Удельный расход потока, выходящего на откос, вычисляется по формуле /12/:

$$q_0 = \frac{k h_1^2}{2L} - \frac{Q'_c}{\delta'} \cdot \frac{l_1 + l_2}{L} - \frac{Q'_c}{\delta'} \cdot \frac{l_1}{L} \quad (II.38)$$

Расчет ведется подбором, исходя из допустимого значения  $q_0$ . Формулы (II.36) – (II.38) могут быть использованы и при заданных других исходных параметрах.

Расчет уровней во всех случаях проводится в соответствии с гл.1, § 2, п.Е.

Пример расчета ряда скважин вблизи совершенного котлована приведен в приложении № 3.

3. Для расчета большого числа взаимодействующих рядов скважин целесообразно привлекать метод фильтрационных сопротивлений (гл.1, § 2, п.Е). Расчет ведется в следующей последовательности /36/:

а) линии скважин заменяются эквивалентными траншеями с уровнями на них  $h_{\phi}$  (см. формулу (1.18)) и погонным притоком  $q = \frac{Q_{cv}}{\delta}$ ,

б) записываются выражения для расхода потока в зонах между рядами и границами потока, а также между отдельными рядами, которые рассматриваются как траншеи;

в) составляются уравнения баланса потока на линиях траншей;

г) балансовые уравнения и уравнения типа (1.18) образуют систему, из которой могут быть найдены все необходимые элементы потока: если заданы дебиты и расстановка скважин, то по балансовым уравнениям найдутся величины уровней на линиях скважин ( $h_{\phi_i}$ ), а затем по формуле (1.18) определяются уровни в скважинах  $h_{cv}$ ; если заданы уровни в скважинах и их расстановка, то из системы сначала исключаются неизвестные величины уровней на линиях скважин ( $h_{\phi_i}$ ), а затем – определяют неизвестные расходы скважин  $Q_{cv}$ .

Пример использования метода фильтрационных сопротивлений приведен в приложениях № 2 и 3.

### В. Учет инфильтрации и "перетекания"

Инфильтрация и перетекание учитываются исходя из тех же принципов, которые изложены в разделе о притоке к открытым выработкам (гл. II, § 1,



$$r_B = \frac{l}{\chi} , \quad (II.42)$$

где  $\chi$  определяется из табл.4.,  
 $p$  - число лучей,  $l$  - их длина.

Таблица 4

$p$	1	2	3	4
$\chi$	4	2	1,86	1,78

Кроме того, вместо  $h_c$  подставляется величина превышения "лучей" над водоупором ( $h_d$ ) или глубина воды в колодце (если уровень воды в колодце выше отметки заложения "лучей").

#### Д. О расчете иглофильтровых установок

Расчет притоков к иглофильтровым установкам производится аналогично расчету водоупонизительных скважин с заданным понижением  $S_H$  (см. гл.1, § 1, п.А), отсчитываемым от первоначального уровня на месте заложения иглофильтров. Ввиду близкого расположения иглофильтров друг от друга, при расчетах необходимо учитывать "несовершенство дренажного контура" (см. гл.1, § 2, п.Ж).

### Г л а в а III.

#### НЕУСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ФИЛЬТРАЦИИ

##### § 1. Расчет фильтрации к открытым горным выработкам<sup>х)</sup>

##### А. Определение притоков к открытым горным выработкам

1. Общий приток к открытой горной выработке, приведенной к "большому колодцу", в условиях неограниченного пласта определяется формулой (I.5), где  $R(t)$  определяется по формулам (I.10) и (I.10а).

---

х) См.сноску к § 1 гл.II.



2. При одномерном плоском движении /28/:

$$q = \frac{k(h_2'^2 - h_2''^2)}{2\sqrt{\pi a t}} + q_e \quad (\text{II.1})$$

- для полуограниченного потока;

$$q = \frac{k(h_2'^2 - h_2''^2)}{2L} [S_q(\tau) + 1] + q_e \quad (\text{II.2})$$

- для потока, ограниченного контуром с постоянным напором;

$$q = \frac{k(h_2'^2 - h_2''^2)}{2L} T_q(\tau) + q_e \quad (\text{II.3})$$

- для потока, ограниченного слабопроницаемым контуром ( $q = q_e = \text{const}$ ).

В приведенных формулах:  $h_2'$  и  $h_2''$  - первоначальная и сниженная глубины на контуре карьера;  $q_e$  - "естественный" расход потока;  $S_q(\tau)$ ,  $T_q(\tau)$  - табулированные функции (рис. 21-а, 21-б).

3. В более сложных условиях питания, а также во всех случаях, когда необходимо получить расчет притоков по участкам, можно пользоваться методом "недеформируемых линии тока" (гл.1, § 4)<sup>х)</sup>.

Для первых этапов понижения, пока влияние внешних границ пласта практически не сказывается на процессе фильтрации ( $t \leq t_0^{min} = \frac{R_{d\ min}^2}{\pi a}$ ),

где  $R_{d\ min}$  - кратчайшее расстояние до ближайшей границы пласта), расчет может быть произведен по формуле (I.5) при величине  $R(t)$ , определенной по формулам (I.10)-(I.10а).

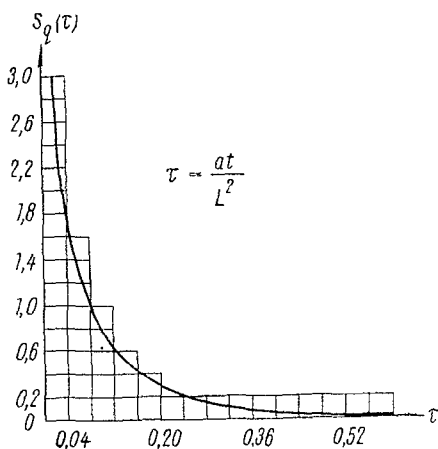


Рис. 21-а.

х) Излагаемый ниже прием является, конечно, приближенным; более точный расчет может быть осуществлен на гидроинтеграторе (сеточном интеграторе) или методом конечных разностей (см.п.Б).

При  $t > \frac{R_{дмн}}{\pi a}$  расчет ведется по выделенным лентам тока в сле-

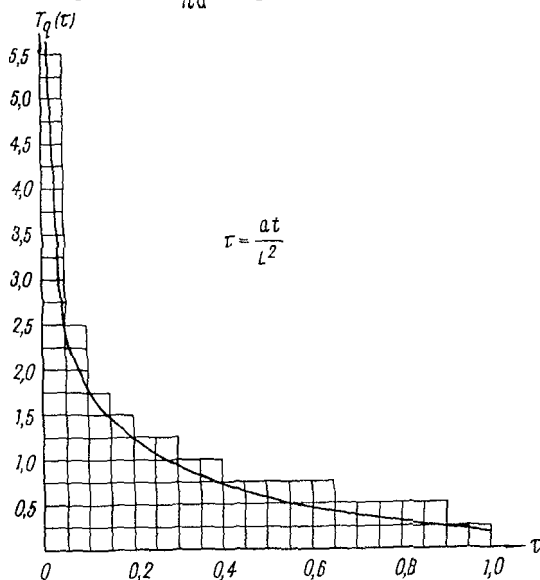


Рис.2I-б.

дующем порядке:

- а) в пределах ленты тока по формулам (I.IO) - (I.IOa) определяется положение условного контура питания на несколько моментов времени  $t_v \leq t_0 = \frac{R_d}{\pi a}$ , где  $R_d$  - длина ленты;
- б) выделенный таким образом на определенный момент времени  $t_v$  ( $t_0^{мин} < t_v < t_0$ ) участок планового потока приводят к плоскому по формулам (I.2) - (I.3);
- в) удельные водопритоки к выработке в пределах ленты на момент времени  $t_v$  определяются по формуле (I.I), где за  $L$  принимается длина выделенного участка ленты  $L_v$ , приведенного к плос-

кому согласно (I.2), а за  $h_1$  - "естественная" глубина потока на условном контуре питания;

г) при  $t > t_0$  расход в пределах ленты тока можно рассчитывать по формулам (III.I) - (III.3) при подстановке вместо  $L$  приведенной длины ленты  $x$ ).

Для водоносных горизонтов больших размеров (в плане), при наличии естественного уклона потока, для моментов времени  $t < t_0^{мин}$  целесообразно также осуществлять построение лент тока, принимая за условную границу пласта какую-либо гидроизогипсу естественного потока. После этого расчет в пределах каждой ленты для моментов времени  $t_v < t_0^{гн} = \frac{R_{ги}}{\pi a}$  (где  $R_{ги}$  - расстояние от выработки до выбранной гидроизогипсы) проводится аналогично описанному выше.

Пример расчета приведен в приложении № 4.

х) Для случая границы с постоянным напором при  $t > t_0$  можно приближенно рассматривать движение как установившееся.

Наряду с расчетным методом, для определения расходов и уровней в пределах ленты тока может применяться моделирование на приборе ЭГДА с использованием схемы Либмана /39/.

Моделирование производится в следующем порядке.

1. Расчетная лента из электропроводной бумаги делится на 5-7 фрагментов с одинаковым сопротивлением  $R_x$ ; по границам фрагментов прокладываются металлические шины.

2. К каждой шине присоединяется дополнительное "временное" сопротивление  $R_{t,i} = R_x \frac{2\alpha \Delta t}{l_{i-1} + l_i}$ , где  $l_{i-1}$ ,  $l_i$  - длины фрагментов, прилегающих к шине;  $\Delta t$  - выбранный шаг времени ( $\Delta t < \frac{t}{3}$ ,  $t$  - расчетный момент времени);  $\alpha$  - коэффициент уровнепроводности (пьезопроводности).

3. Через "временные" сопротивления  $R_{t,i}$  на шины подаются потенциалы  $u_{i,0}$ , отвечающие естественным (первоначальным) уровням в соответствующих сечениях потока; электрические потенциалы  $u_{i,1}$ , замеренные на шинах, отвечают уровням в этих сечениях в момент времени  $t_1 = \Delta t$ .

4. Полученные на шинах на момент времени  $t_1$  потенциалы  $u_{i,1}$  подводятся к "временным" сопротивлениям и с шин снимаются потенциалы  $u_{i,2}$ , отвечающие уровням в момент времени  $t_2 = 2\Delta t$ , и т.д.

5. При моделировании процесса неустановившейся фильтрации в пределах ленты тока могут быть просто и точно учтены такие факторы, как "перетекание" из смежных водоносных горизонтов, инфильтрация (путем введения в электрическую схему дополнительных элементов), уклон водоупора, изменение коэффициента уровнепроводности с течением времени и другие.

Не представляет труда также учет снижения уровня на контуре карьера и перемещения борта во времени.

Отметим, что тот же принцип моделирования сохраняется и при наличии дренажных устройств в пределах ленты; конечно, в этом случае исходная модель для построения лент тока должна включать эти дренажные устройства.

## Б. Р а с ч е т у р о в н е й

1. Расчет уровней при плоском одномерном движении может вестись по формулам /28/:

$$h(x) = \sqrt{h_e^2(x) - (h_1^2 - h_2^2)[1 - \Phi(\lambda)]} \quad (\text{Ш.4})$$

для полуограниченного потока,

$$h(x) = \sqrt{h_e^2(x) - (h_1^2 - h_2^2)\left[1 - \frac{x}{L} - S\left(\tau, \frac{x}{L}\right)\right]} \quad (\text{Ш.5})$$

для ограниченного потока с контуром питания  $h = \text{const}$ ,

$$h(x) = \sqrt{h_e^2(x) - (h_1^2 - h_2^2)\left[1 - T\left(\tau, \frac{x}{L}\right)\right]} \quad (\text{Ш.6})$$

для потока, ограниченного слабопроницаемым контуром, вдоль которого выполнено условие  $q = q_e = \text{const}$ .

Здесь  $\Phi(\lambda)$ ,  $S\left(\tau, \frac{x}{L}\right)$ ,  $T\left(\tau, \frac{x}{L}\right)$  - табулированные функции,

$x$  - расстояние от контура стока до расчетной точки,

$$\lambda = \frac{x}{2\sqrt{at}} \quad , \quad \tau = \frac{at}{L^2} \quad ,$$

$h_e(x)$  - "естественная" глубина потока в расчетной точке.

Значения этих функций можно определить по графикам: рис.22-а -  $\Phi(\lambda)$ , рис.22-б -  $S\left(\tau, \frac{x}{L}\right)$ , и рис.22-в -  $T\left(\tau, \frac{x}{L}\right)$ .

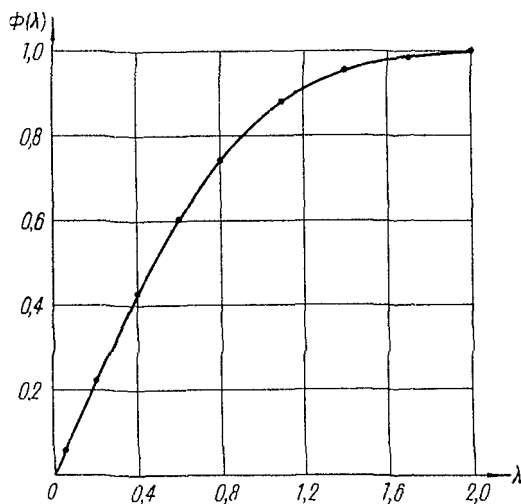


Рис.22-а.

2. Расчет уровней при осесимметричном движении в неограниченном пласте проводится по формуле /6/:

$$h_r^2 = h_e^2(r) - (h_1^2 - h_2^2)[1 - R(\gamma, \bar{r})], \quad (\text{Ш.7})$$

где  $R(\gamma, \bar{r})$  - табулированная функция (рис.23),

$r$  - расстояние от центра симметрии до расчетной точки.

3. В остальных случаях приближенный расчет уровней можно осуществить, пользуясь сеткой движения и методом "недеформируемых линий тока" (см.п.А).

Можно также рекомендовать использование приближенной формулы /36/:

$$S = S_y \frac{S_z^0}{S_y^0} \quad , \quad (\text{Ш.8})$$

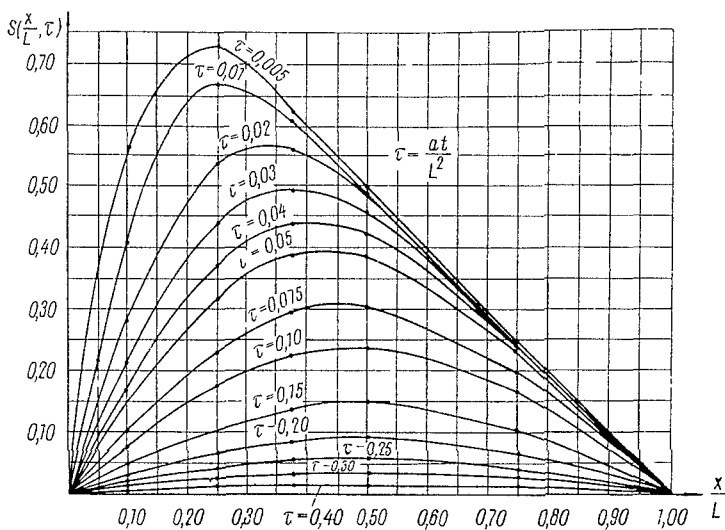


Рис.22-б.

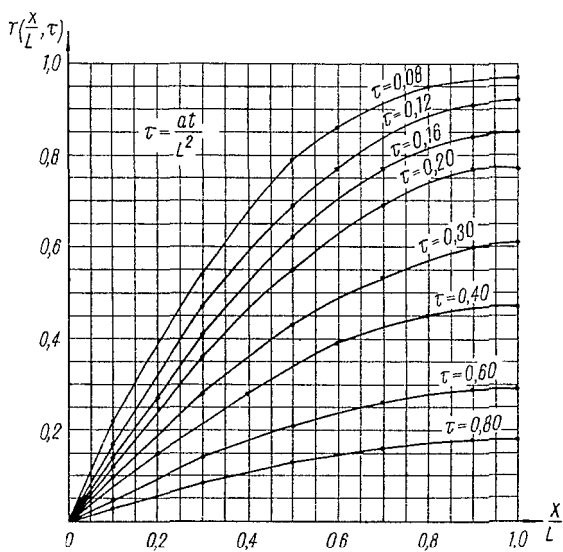


Рис.22-в.

где  $z_y$  - понижение при установившемся режиме фильтрации,  
 $z_y^0$  - установившееся понижение в расчетной точке при предположении, что движение плоское (одномерное),  
 $S_i^0$  - понижение в расчетной точке на момент  $t$  при предположении, что движение плоское (одномерное).

Для более точного расчета необходимо проводить моделирование на сеточных интеграторах или пользоваться методом конечных разностей. Согласно этому методу, область фильтрации разбивается на квадратную сетку с шагом  $\Delta l$ , после чего расчет уровней проводится по формуле:

$$\frac{h_{n,i,t+1} - h_{n,i,t}}{\Delta t} = \frac{a}{(\Delta l)^2} (h_{n-1,i,t} + h_{n+1,i,t} + h_{n,i,t-1} + h_{n,i,t+1} - 4h_{n,i,t}) \quad (\text{III.9})$$

где  $h_{n,i,t}$  - глубина потока в узле  $(n,i)$  на момент времени  $t$ ;

$h_{n,i,t+1}$  - глубина потока в узле  $(n,i)$  на момент  $t + \Delta t$ .

Величина  $\Delta l$  выбирается удовлетворяющей соотношению  $\frac{a \Delta t}{\Delta l^2} \leq \frac{1}{4}$ .

Определение уровней осуществляется последовательным расчетом от квадрата к квадрату; пример такого расчета можно найти в работе /3/.

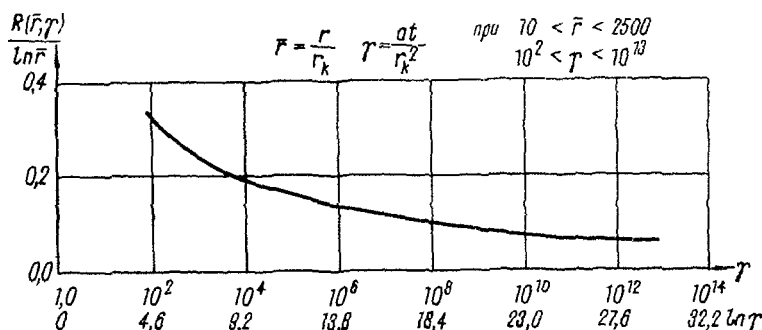


Рис.23.

## В.Взаимодействие горных выработок при не установившемся режиме

Наиболее часто взаимодействие приходится учитывать при работе параллельных траншей (канал, штреков). Если обе траншеи начинают дренировать пласт (бассейн) одновременно, то время снижения уровня определяется формулой /4/:

$$t = \frac{0,22 \mu \sigma^2 (h_0 - h_{\text{сн}})}{k h_0 h_{\text{сн}}}, \quad (\text{Г.10})$$

где  $h_{\text{сн}}$  - сниженная глубина потока в среднем сечении,  $\sigma$  - расстояние между траншеями.

Если вторая траншея включается в работу после того, как режим фильтрации, обусловленный действием первой траншеи, установился, то:

$$h_{\text{сн}} = 1,13 h_0 \exp \left( - \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{\sigma^2} a t \right), \quad (\text{III.11})$$

где  $h_0$  - первоначальная глубина в среднем сечении.

В более сложных условиях необходимо использовать моделирование или метод конечных разностей.

### Г. Определение суммарного водопритока в карьер при вскрытии напорного горизонта

Общий объем воды, поступающей в карьер с момента вскрытия до момента  $t_0$ , определяется по формуле /6/:

$$Q_{\text{сум}} = \frac{4 \pi k m S r_k^2}{2,25 \beta} \bar{E}_t \left( \ln \frac{2,25 \beta t_0}{r_k^2} \right) \quad (\text{III.12})$$

Формулой (III.12) следует пользоваться при условии:  $\frac{r_k^2}{\beta t_0} < 0,05$ . Значения  $\bar{E}_t(x)$  приведены в табл.5 /38/.

Таблица 5

$x$	$\bar{E}_t(x)$	$x$	$\bar{E}(x)$
4,0	19,6309	6,0	85,9898
4,1	21,0485	7,0	191,505
4,2	22,5774	8,0	440,380
4,3	24,2274	9,0	1037,88
4,4	26,0090	10,0	2492,23
4,5	27,9337	11,0	6071,41
4,6	30,0141	12,0	14959,5
4,7	32,2639	13,0	37197,7
4,8	34,6979	14,0	93192,5
4,9	37,3325	15,0	234956,0
5,0	40,1853		

## Д. Расчет притоков в условиях подвижных границ области фильтрации.

1. Учет скорости перемещения фронта рабочего борта карьера  $v$  может осуществляться с помощью формулы:

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{l - vt} \quad (III.13)$$

где величина  $l$  определяется по формуле:

$$l = \frac{2a l_0}{v} + vt \quad (III.14)$$

$l_0$  - находится по графику (рис.24) в зависимости от величины

$$t_0 = \frac{v^2}{2a} t.$$

Скорость перемещения  $v$  имеет смысл учитывать при  $\frac{v^2}{a} t > 0,1$ .

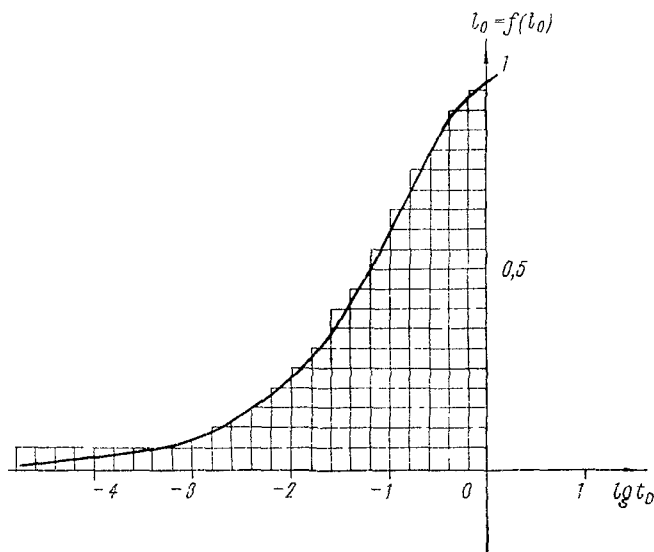


Рис.24.

2. Особым случаем является неуставившаяся фильтрация при наклонном залегании пластов в условиях постепенного "истощения" горизонта (рис.25).

Время "полного" истощения пласта определяется формулой:

$$t = \frac{\mu H}{k \sin^2 \alpha - w} \quad (III.15)$$

где  $\alpha$  - угол наклона пласта,

$H$  - первоначальный перепад напоров.

Формула (III.15) справедлива при условии, что фильтрация носит неуставившийся характер.



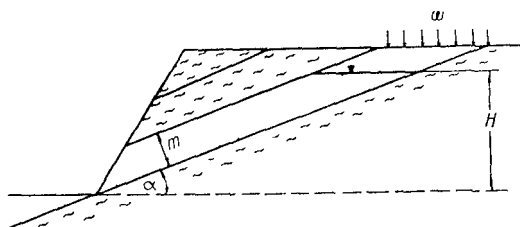


Рис. 25. Схема к расчету времени "истощения" напорного водоносного горизонта

Е. З а м е ч а н и е о б о п р е д е л е н и и к о э ф ф и -  
 ц и е н т о в у р о в н е п р о в о д н о с т и и  
 п ь е з о п р о в о д н о с т и

В тех случаях, когда указанные параметры не получены опытным путем, их приходится определять расчетом.

Коэффициент урoвнeпрoвoднoсти определяется по формуле /28/:

$$\alpha = \frac{k h_{\text{ср}}}{\mu} \quad , \quad (\text{Ш.16})$$

$$h_{\text{ср}} = \frac{h_2' + h_2'' + h_1}{3} \quad , \quad (\text{Ш.17})$$

где  $h_2'$  и  $h_2''$  - первоначальная и сниженная глубина потока на контуре стока,

$h_1$  - глубина потока на контуре питания; для полуограниченного потока за  $h_1$  принимается глубина потока на границе условной зоны влияния (см.гл.1, § 2, п.В).

Коэффициент пьезопроводности может быть вычислен по формуле/35/:

$$\beta = \frac{k(1 + \varepsilon)}{\gamma(a_y + \frac{\varepsilon}{E_B})} \quad , \quad (\text{Ш.18})$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент пористости грунта, соответствующий "бытовой" нагрузке,

$\gamma$  - объемный вес воды,

$a_y$  - коэффициент уплотнения грунта в интервале от "бытовых" нагрузок до нагрузок, соответствующих сниженным напорам,

$E_B$  - модуль упругости воды ( $E_B \approx 2,2 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$ ).

## § 2. Расчет водопонижительных скважин

### А. Скважины с постоянным во времени дебитом

#### 1. Расчет для типовых граничных условий

а. Для одиночной скважины основной является формула:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2Qc}{k} \int_{ct}, \quad (\text{Ж.19})$$

где  $\int_{ct}$  - функция понижения. (см.табл.6) /35/

Для определения функции понижения в самой скважине следует принимать:  $r = r_c$ ,  $r' = 2l_1$ ,  $r'' = 2l_2$ ,  $x = 0$ ;  $y = 0$ .

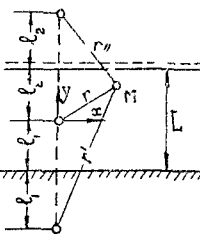
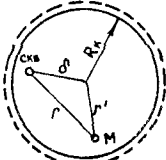
Значения интегральной экспоненциальной функции  $E_i(x)$  определяются по табл.7.

При  $\frac{L^2}{4at} < 0,5$  - для схем 2-3, при  $\frac{L^2}{4at} < 0,1$  - для схемы 4 и при  $\frac{R^2}{4aL} < 0,5$  - для схемы 5 - режим может считаться установившимся /6/.

Таблица 6.

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Выражение для $\int_{ct}$
1. Скважина в неограниченном пласте.		$\int_{ct} = -\frac{1}{4\pi} E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$
2. Скважина у прямолинейного контура питания (стока).		при $\frac{L^2}{4at} > 0,5$ $\int_{ct} = -\frac{1}{4\pi} \left[ E_i\left(-\frac{4L^2 - 4Ly + r^2}{4at}\right) - E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \right]$
3. Скважина в полозосообразном пласте с двумя контурами питания (стока).		при $\frac{L^2}{4at} > 4$ : $\int_{ct} = -\frac{1}{4\pi} \left\{ E_i\left[-\frac{(r')^2}{4at}\right] + E_i\left[-\frac{(r'')^2}{4at}\right] - E_i\left[-\frac{r^2}{4at}\right] \right\};$ при $4 > \frac{L^2}{4at} > 0,5$ : $\int_{ct} = \int_{ct} - \sin \frac{\pi c_1}{L} \sin \frac{\pi(L-y)}{L} F^*\left(\frac{x}{L}, \frac{L^2}{4at}\right) -$ $-\frac{1}{2} \sin \frac{2\pi c_1}{L} \sin \frac{2\pi(L-y)}{L} F^*\left(\frac{2x}{L}, \frac{L^2}{4at}\right),$ где $\int_{ct}$ - берется из табл. 2, а функция $F^*$ - с графика (рис.26)

(продолжение табл.6)

<p>4. Сквжина в поло- сообразном пласте с одним контуром питания (стока) и одним непроницае- мым контуром</p>		<p>при <math>\frac{L^2}{4at} \gg 4</math></p> $f_{ct} = \frac{1}{4\pi} \left\{ E_i \left[ -\frac{(r'')^2}{4at} \right] - E_i \left[ \frac{(r')^2}{4at} \right] - E_i \left[ -\frac{r^2}{4at} \right] \right\},$ <p>при <math>4 &gt; \frac{L^2}{4at} &gt; 0,1</math></p> $f_{ct} = f_c - 2 \sin \frac{\pi l_2}{2L} \sin \frac{\pi(l_2 - y)}{2L} F^* \left( \frac{a}{2L}, \frac{4L}{at} \right) -$ $- \frac{2}{3} \sin \frac{3\pi l_2}{2L} \sin \frac{3\pi(l_2 - y)}{2L} F^* \left( \frac{3a}{2L}, \frac{4L}{9at} \right),$ <p>( <math>f_c</math> определяется по табл. 2 ).</p>
<p>5. Сквжина в пласт- е с круговым контуром питания</p>		<p>при <math>\frac{R^2}{4at} &gt; 0,5</math></p> $f_{ct} = \frac{1}{4\pi} \left[ E_i \left( -\frac{L_p^2}{4at} \right) - E_i \left( -\frac{r^2}{4at} \right) \right]$ <p>, где</p> $L_p = \sqrt{R^2 + \frac{(r')^2 d^2}{R^2} - d^2 + r^2 - (r')^2}$

Т а б л и ц а 7

$x$	$E_i(-x)$	$x$	$E_i(-x)$	$x$	$E_i(-x)$
0,03	-2,959	0,30	-0,906	1,10	-0,186
0,04	-2,681	0,35	-0,794	1,20	-0,158
0,05	-2,463	0,40	-0,702	1,30	-0,136
0,06	-2,295	0,45	-0,625	1,40	-0,116
0,07	-2,151	0,50	-0,561	1,50	-0,100
0,08	-2,027	0,55	-0,503	1,70	-0,075
0,09	-1,919	0,60	-0,454	1,90	-0,056
0,10	-1,823	0,65	-0,412	2,10	-0,042
0,12	-1,660	0,70	-0,374	2,5	-0,025
0,14	-1,524	0,75	-0,340	3,0	-0,017
0,16	-1,409	0,80	-0,311	3,5	-0,012
0,18	-1,310	0,85	-0,284	4,0	-0,008
0,20	-1,225	0,90	-0,260	4,5	-0,005
0,23	-1,110	0,95	-0,239	5,0	-0,003
0,26	-1,014	1,00	-0,219		

Примечание. при  $x < 0,03$ 

$$E_i(-x) = 1/x + 0,58$$

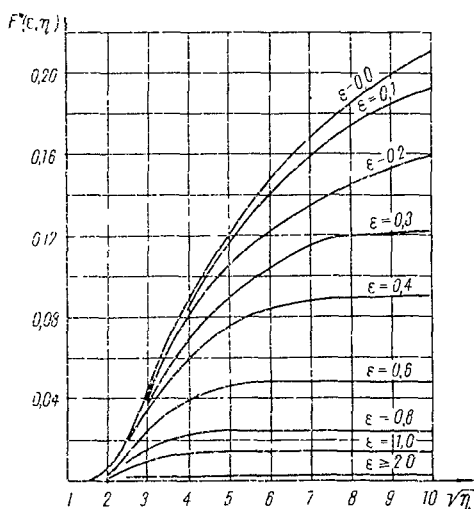


Рис.26.

б. Расчет группы отдельно стоящих скважин проводится по формуле /35/:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2}{k} \sum_{i=1}^n Q_{ci} f_{ci} \quad (III.20)$$

где  $i = 1, 2, 3 \dots n$  - номера скважин.

в. Расчет водопонижительных контуров, приведенных к "большим колодцам", может проводиться по формуле (III.19) при замене  $Q_c$  на общий расход установки  $Q_{уст}$ , определяемый по формуле:

$$Q_{уст} = \frac{k(h_0^2 - h_2^2)}{2f_{kt}} \quad (III.21)$$

где  $h_0$  и  $h_2$  - первоначальная и требуемая (на момент  $t$ ) сниженная глубина в центре установки;  $f_{kt}$  - функция понижения, определяемая по формуле:

$$f_{kt} = -\frac{1}{4\pi} \left[ E_v \left( -\frac{r_k^2}{4at} \right) - E_v \left( -\frac{R^2}{4at} \right) \right] \quad (III.22)$$

где  $k$  - определяется по табл.1.

Приведением к "большому" колодцу можно пользоваться (при выполнении условия применимости формулы (1,5)):

- 1) для расчета уровней в центре колодца;
- 2) для расчета уровней в любой точке, расположенной внутри колодца - при  $\frac{at}{r_k^2} > 3,5$ ;
- 3) для расчета уровней в точках, расположенных вне колодца и удовлетворяющих условию  $\frac{r}{r_k} > 1,5$  - при  $\frac{at}{r_k^2} > 5$ .

г. Расчет линейного ряда скважин проводится по формуле /12/:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2Q_{уст}}{k} f_{kt} \quad (III.23)$$

где

$$f_{kt} = \frac{l_1}{2l} F(\bar{\Delta}_0', \lambda_1) + \frac{l_2}{2l} F(\bar{\Delta}_0'', \lambda_2) + 0,008 E_i \left( -\frac{R^2}{4at} \right) \quad (III.24)$$

$l$  - длина ряда,  $\Delta_0$  - длина перпендикуляра, опущенного из расчетной точки на линию ряда или на ее продолжение,  $\bar{\Delta}_0' = \frac{\Delta_0}{l_1}$ ;  $\bar{\Delta}_0'' = \frac{\Delta_0}{l_2}$ ,

$l_1$  и  $l_2$  - расстояния от концов ряда до оснований перпендикуляра,  $R$  - расчетное расстояние от точки в середине ряда до области питания (определяется по табл.1),

$$\lambda = \frac{l}{2\sqrt{at}} , \quad \lambda_1 = \frac{l_1}{l} \lambda , \quad \lambda_2 = \frac{l_2}{l} \lambda$$

Значения функции  $F(\lambda, \bar{\Delta}_0)$  определяются по графику (рис.27).

При  $\lambda \leq 0,5$  величину  $f_{kt}$  можно определять по формуле (III.22), заменяя  $r_k$  на  $r_{эф}$  ( $r_{эф}$  определяется по рис.15).

При  $\frac{R^2}{4at} \leq 0,1$  движение можно считать установившимся. Поперечный расчет на максимальное понижение в скважинах ряда должен производиться для центральной скважины по формуле (III.23), при замене величины  $f_{kt}$  на величину  $f_{kt} + \frac{1}{n} \Phi_k$  ( $\Phi_k$  - определяется по графику - рис.6,  $n$  - число скважин ряда) и при  $\Delta_0 = r_c$ .

д. Расчет водопонизительных контуров сложной формы осуществляется суммированием понижений, вызванных работой отдельных участков контура, определяемых из формулы (III.23).

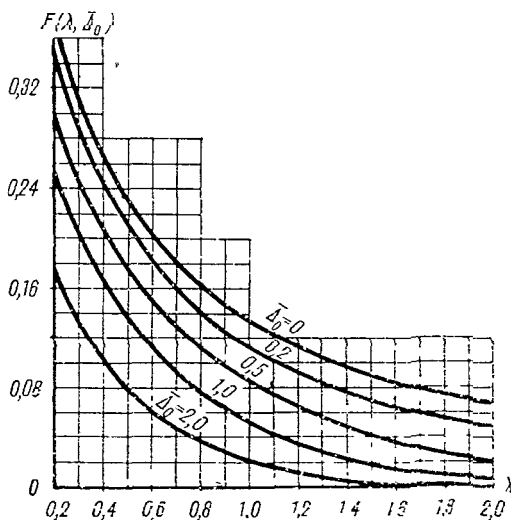


Рис.27.

\* Если основание перпендикуляра  $\Delta_0$  попадает на границы линии ряда, то  $\lambda_1$  должно браться со знаком (-).

е. Расчет группы скважин, расположенных равномерно по некоторой площади, может проводиться по формуле (Ш.21) после приведения к "большому колодцу". Этот прием допустим:

1) для расчета понижений в точках, удовлетворяющих условию  $\frac{r}{r_k} > 1,5-2$ ;

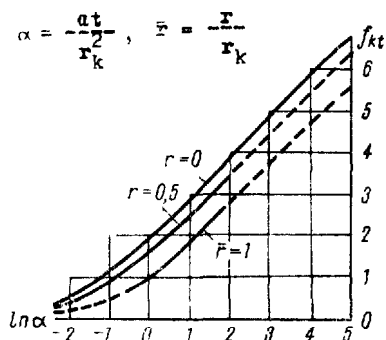


Рис.28.

2) для расчета понижений во внутренних точках осушаемой площади, если определять суммарную функцию понижения  $f_{kt}$  по графику (рис.28) /6/.

ж. Учет неодновременности введения в работу скважин; учет изменения дебита скважин.

Для определения функции понижения  $f_{t_{сум}}$  от работы "и" скважин, включаемых в равное время и меняющих свой дебит по заданному "ступенчатому" графику (рис.29), можно пользоваться формулой /6/:

$$f_{t_{сум}} = \sum_{i=1}^n f_{ct} = \ln \frac{2,25 a t_{cp}}{\rho^2} \quad (\text{Ш.25})$$

где  $\ln t_{cp} = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_{i,1} \ln t_p + \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_{i,2} \ln (t_p - t_{i,1}) +$   
 $+ \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_{i,n} \ln (t_p - t_{i,n-1})$

$$\rho_s = r_s \left( \frac{r_1}{r_s} \right)^{T_1} \left( \frac{r_2}{r_s} \right)^{T_2} \dots \left( \frac{r_n}{r_s} \right)^{T_n}$$

1,2,3 ... n - номера скважин.

$r_i$  - расстояние от данной точки (где определяется понижение) до i-ой скважины,

$t_{i,j}$  - время окончания j-го этапа работы i-ой скважины (отсчитывается от начала работы первой скважины);

$Q_{i,j}$  - расход i-ой скважины на j-ом этапе.

$$\alpha_{i,j} = \frac{Q_{i,j}}{Q_{сум}} - \frac{Q_{i,j-1}}{Q_{сум}};$$

$Q_{сум}$  - суммарный расход скважин в момент  $t_p$ ,

$$T_i = \frac{Q_{i,t_p}}{Q_{сум}},$$

$r_s$  - расстояние от точки, в которой определяется понижение, до скважины номер  $S$ , принимаемой за расчетную (например, скважина, расположенная вблизи центра установки),

$Q_{i,t_p}$  - расход  $i$ -ой скважины в момент  $t_p$ ,  $t_p$  - момент времени, для которого определяется понижение в расчетной точке (отсчитывается от момента включения первой скважины).

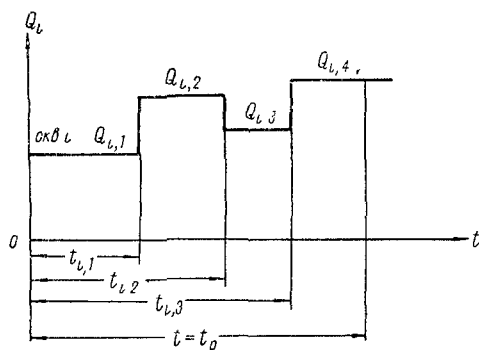


Рис. 29. График изменения дебита  $i$ -ой скважины

## 2. Расчет для сложных граничных условий

а. Приближенный расчет одиночной скважины проводится по формуле (Ш.19), где величина  $f_{ct}$  определяется формулой [36]:

$$f_{ct} = \frac{1}{4\pi} \left[ E_i \left( -\frac{R^2}{4at} \right) - E_i \left( -\frac{r^2}{4at} \right) \right], \quad (\text{Ш.26})$$

где  $r$  - расстояние от скважины до расчетной точки,

$R$  - расчетное расстояние до областей питания, которое можно найти из формулы:

$$R = r e^{2\pi f_c} \quad (\text{Ш.27})$$

Величина  $f_c$  в формуле (Ш.27) является функцией понижения для установившейся фильтрации (II.28);

б. Приближенный расчет группы отдельно стоящих скважин проводится по формуле (Ш.20), где величины  $f_{cti}$  определяются по формуле (Ш.26);

в. Контурные системы, приведенные к "большому колодцу", рассчитываются аналогично п.а;

г. линейные системы могут приближенно рассчитываться по формуле

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2Q_c}{k} n(f_{ct} - \Delta f), \quad (\text{Ш.28})$$

где  $n$  — число скважин ряда,

$f_{ct}$  — функция понижения для средней скважины ряда (определяется по формуле (III.26)),

$\Delta f$  — величина, определяемая формулой (II.21).

Методика определения величины  $r_{зф}$ , входящей в выражение  $\Delta f$ , для малых значений времени отличается от случая установившегося движения (см. гл. II, § 2, А): вместо длины ряда подставляется длина "активной зоны", а остальная часть ряда считается бездействующей. "Активная зона" захватывает отрезок ряда, заключенный в интервале  $\pm 2\sqrt{\alpha t}$  (начиная от отсчета — в основании перпендикуляра, опущенного на линию скважин из расчетной точки). Такой расчет дает достаточно правильный результат при условии, что расчетные точки удалены от ряда на расстояние, большее  $\delta$ .

Д. Расчет контуров сложной формы может проводиться по формуле:

$$w^2 = w_0^2 - \frac{2Q_c}{k} \sum_{i=1}^p [n(f_{ct} - \Delta f)]_i, \quad (\text{III.29})$$

где индекс "i" относится к отдельным участкам контура,  $p$  — число таких участков.

3. Расчет линейного ряда скважин в условиях наклонного напорного пласта, с учетом его "истощения" (рис. 30).

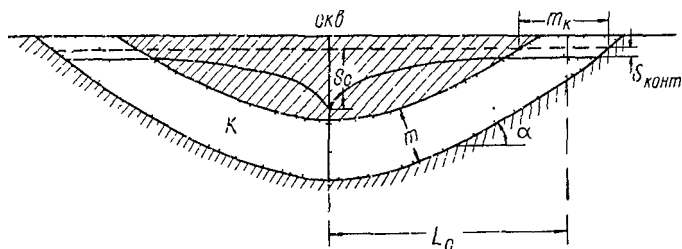


Рис. 30. Ряд скважин в условиях мульдообразного пласта

Расчет понижения на линии скважин производится по формуле [29]:

$$s_\phi = \frac{Q_c}{s} \left[ \frac{L_0}{2km} + \frac{(t - t_0)(1 - \gamma)}{\mu^* L_0 (2 - \gamma) \frac{1 - 2\gamma}{1 - \gamma} + 2\mu^* m_k} \right], \quad (\text{III.30})$$

$$\text{где } \gamma = \frac{Q_c}{26km\beta\alpha}; \quad \mu^* = \frac{km}{\beta}; \quad t_0 = \frac{L_0^2}{\pi\beta}$$

Понижение в скважине определяется по формуле:

$$s_c = s_\phi + \frac{Q_c}{2\pi km} \ln \frac{s}{\pi d_c} \quad (\text{III.31})$$



Как всегда, должно выполняться соотношение  $(h_{0c} - s_c) > 0$ .

Понижение на границе определяется:

$$s_{\text{границы}} = \frac{s_{\phi} - \frac{Q_c L_0}{2 \sigma \Phi_K}}{1 - \gamma} \quad (\text{III.32})$$

### Б. Скважины с постоянным во времени понижением

а. Для одиночной скважины в неограниченном пласте расходы и уровни рассчитываются согласно § 1 гл. III.

б. Для взаимодействующих скважин аналитическое решение получено лишь для бесконечных рядов равноудаленных скважин с одинаковыми уровнями.

Для ряда скважин в неограниченном пласте формулы имеют вид /36/.

$$Q_c = \frac{k(h_0^2 - h_c^2)}{2\Phi_K + \frac{R_p}{\sigma}} \quad (\text{III.33})$$

где  $\Phi_K$  находится по графику (рис.3), а  $R_p$  - по графику (рис.31):

$$h = \sqrt{h_0^2 - (h_0^2 - h_c^2) \frac{R_p - x}{R_p + 2\sigma\Phi_K}} \quad (\text{III.34})$$

где  $x$  - расстояние от точки, в которой определяется уровень, до ряда.

Для двух параллельных рядов скважин в неограниченном пласте, находящихся на расстоянии  $2L_0$  друг от друга /36/:

$$Q_c = \frac{k[(h_0 - s_{\phi})^2 - h_c^2]}{2\Phi_K} \quad (\text{III.35})$$

где  $s_{\phi}$  - среднее понижение на линии ряда, определяемое по графику (рис.32);

понижение  $s_K$  по линии, проходящей посередине между рядами, определяется по графику (рис.32). Формулой (III.35) и графиком (рис.32) следует пользо-

ваться при  $t > t_0 = \alpha^2 \frac{\sigma^2 \Phi_K^2}{q}$ , где  $\alpha$  определяется из табл.8.

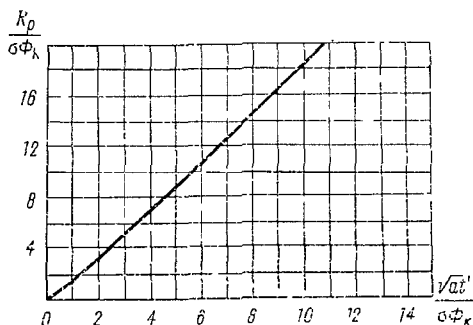


Рис. 31. График для определения функции  $R_p$

Т а б л и ц а 8

$L_0 / \sigma \Phi_K$	2	4	6	8	10
$\alpha$	1,3	2,5	3,5	4,6	5,7

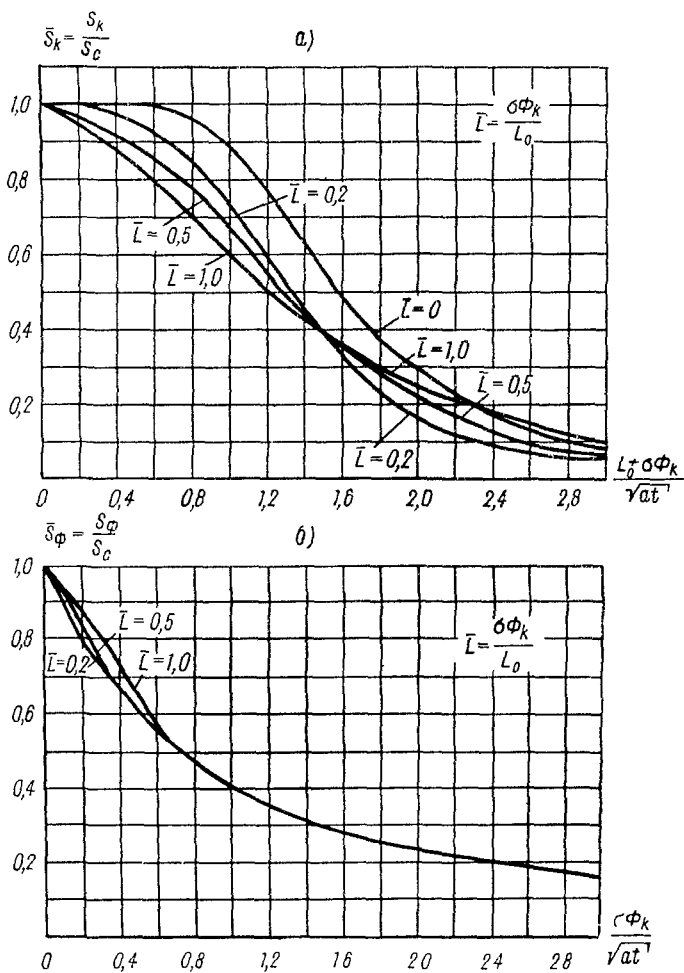


Рис. 52.

- а) График для расчета понижения уровней на оси симметрии  
( посередине между рядами)
- б) График для расчета относительного понижения среднего  
уровня на линии скважин

$$\text{При } \frac{L_0}{\phi \Phi_K} > 10 \quad b = \frac{(L_0 + 2\phi \Phi_K)^2}{4a}$$

При  $1 < l_0$  справедливы формулы (Ш.33) и (Ш.34).

в. Приближенные расчеты для скважин, расположенных по некоторому контуру, можно проводить по формулам установившегося движения, подставляя в них "неустановившийся радиус влияния", определяемый по формуле (1.10).

г. Более точные результаты можно получить моделированием на приборе ЭГДА – с привлечением метода "недеформируемых линий тока" (гл. II, § 1, п. А), а также на гидроинтеграторах или на сеточных интеграторах.

### В. Расчет разгрузки напорных водоносных горизонтов

1. Расчет напорных потоков с учетом их упругого режима проводится по формулам, выведенным для неустановившегося безнапорного движения, при замене "а" на  $\beta$  и  $(h_1^2 - h_K^2)$  на  $2m S_{1,K}$ .

2. Так как в напорных горизонтах существенную роль имеет "перетекание" через "водоупорные" слои, то мы особо рассмотрим расчет разгрузки напорного горизонта с учетом "перетекания"; при этом принимается, что "подпитка" идет за счет водообильного горизонта, уровни которого практически не зависят от "перетекания".

Дебит группы скважин в неограниченном пласте определяется зависимостью /35/:

$$Q_y = \frac{k m S_K}{f_K^n}, \quad (\text{Ш.36})$$

где  $S_K$  – понижение в центре установки,

$f_K^n$  – функция понижения для пласта с наличием "перетекания", определяемая по графику (рис. 33) в зависимости от  $-\frac{r}{b} (b = \sqrt{\frac{k m m_b}{K_b}}$ , индекс "в" относится к "водоупору") и величины  $\alpha_n = \frac{b^2}{4\beta l} (f_K^n = f^n \text{ при } r = r_K)$ .

После определения величины  $Q_y$  следует сделать проверку величины понижения в скважине по формуле:

$$S_c = \frac{Q_y}{k m} f_c^n, \quad (\text{Ш.37})$$

где  $f_c^n$  – находится по графику (рис. 33) при  $r = r_{oc}$ . Величина  $r_{oc}$  (среднее расстояние от расчетной скважины до других скважин) определяется по формуле (1.16). Должно быть выполнено условие:

$$S_c < h_{oc}.$$

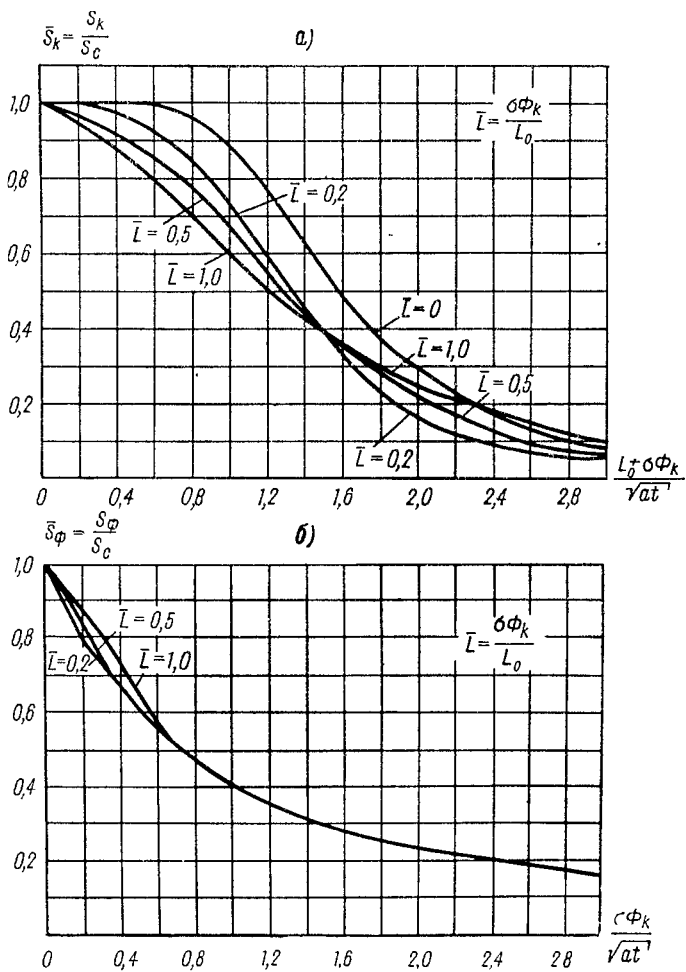


Рис. 32.

- а) График для расчета понижения уровней на оси симметрии  
( посередине между рядами)
- б) График для расчета относительного понижения среднего  
уровня на линии скважин

$$\text{При } \frac{L_0}{\sigma \Phi_k} > 10 \quad l = \frac{(L_0 + 2\sigma \Phi_k)^2}{4a}$$

При  $l < l_0$  справедливы формулы (Ш.33) и (Ш.34).

в. Приближенные расчеты для скважин, расположенных по некоторому контуру, можно проводить по формулам установившегося движения, подставляя в них "неустановившийся радиус влияния", определяемый по формуле (1.10).

г. Более точные результаты можно получить моделированием на приборе ЭГДА – с привлечением метода "недеформированных линий тока" (гл. III, § 1, п.А), а также на гидроинтеграторах или на сеточных интеграторах.

### В. Расчет разгрузки напорных водоносных горизонтов

1. Расчет напорных потоков с учетом их упругого режима проводится по формулам, выведенным для неустановившегося безнапорного движения, при замене "а" на  $\beta$  и  $(h_a^2 - h_k^2)$  на  $2m S_{i,k}$ .

2. Так как в напорных горизонтах существенную роль имеет "перетекание" через "водоупорные" слои, то мы особо рассмотрим расчет разгрузки напорного горизонта с учетом "перетекания"; при этом принимается, что "подпитка" идет за счет водообильного горизонта, уровни которого практически не зависят от "перетекания".

Дебит группы скважин в неограниченном пласте определяется зависимостью /35/:

$$Q_y = \frac{k m S_k}{f_k^n}, \quad (\text{Ш.36})$$

где  $S_k$  – понижение в центре установки,

$f_k^n$  – функция понижения для пласта с наличием "перетекания", определяемая по графику (рис.33) в зависимости от  $\frac{r}{b}$  ( $b = \sqrt{\frac{k_{ин} m}{k_v}}$ , индекс "в" относится к "водоупору") и величины  $\alpha_n = \frac{b^2}{4\beta l}$  ( $f_k^n = f^n$  при  $r = r_k$ ).

После определения величины  $Q_y$  следует сделать проверку величины понижения в скважине по формуле:

$$S_c = \frac{Q_y}{k m} f_c^n, \quad (\text{Ш.37})$$

где  $f_c^n$  – находится по графику (рис.33) при  $r = r_{oc}$ . Величина  $r_{oc}$  (среднее расстояние от расчетной скважины до других скважин) определяется по формуле (1.16). Должно быть выполнено условие:

$$S_c < h_{oc}.$$

# Г. О расчете иглофильтровых установок

Иглофильтровые установки, в принципе, следует рассчитывать как ряды скважин с постоянным понижением (см. гл. III, § 2, п.Б, а также гл. II, § 2, п.Д). Для контурных установок, расположенных вблизи промежутка выщаживания, с достаточной степенью точности можно обычно считать, что приток к линии иглофильтровых установок на каждый момент времени ( $t$ ) равен расчетному притоку к карьере на тот же момент времени ( $t$ ). Определив, таким образом, удельный приток к линии иглофильтров, расчет расходов иглофильтровой установки можно провести для каждого момента ( $t$ ) по формулам установившегося движения.

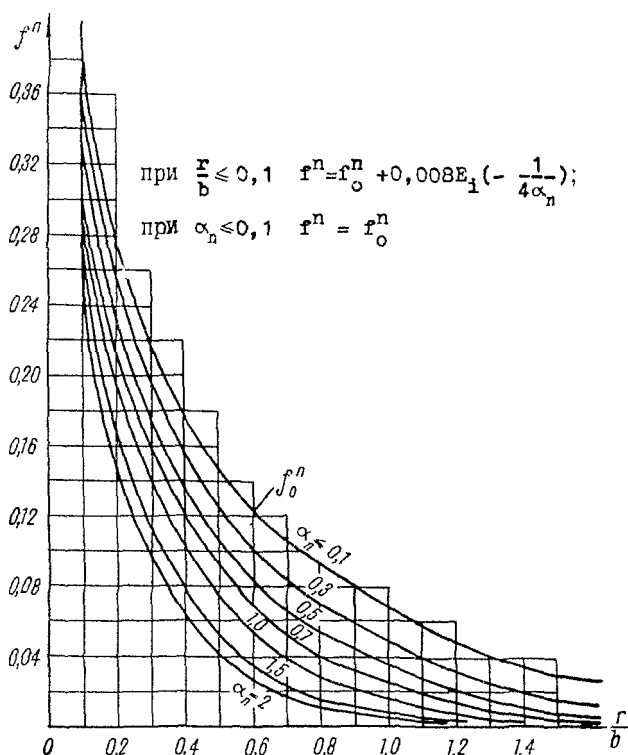


Рис. 33. График функции  $f^n(\frac{r}{b}, \alpha_n)$

Таблица — шифр

№ № п.п.	Цель расчета		Соответствующий раздел текста
1	2	3	4
1.	Расчет притоков к карьеру и уровней в зоне его влияния	1. Порядок расчета 2. Граничные условия 3. Расчет водопритоков и уровней в "нормальных" условиях: а) при установившемся движении, б) при неустановившемся движении. 4. Расчет суммарного притока к карьеру при вскрытии напорного горизонта 5. Переход от формул безнапорной фильтрации к напорной 6. Учет напорно-безнапорного характера фильтрации 7. Учет инфильтрации 8. Учет "перетекания" 9. Учет несовершенства 10. Учет уклона и волнистости водоупора 11. Учет естественного уклона потока 12. Учет неоднородности фильтрующей толщи 13. Учет промежутков высачивания 14. Учет подвижности границ области фильтрации	гл.1, § 5 гл.1, § 1, п.А гл.II, § 1 гл.Ш, § 1 гл.Ш, § 1, п.Г гл.1, § 2 (введение) гл.1, § 2, п.Д гл.1, § 1, п.В и гл.П, § 1, п.В гл.1, § 1, п.В и гл.П, § 1, п.Г гл.1, § 2, п.Ж2 гл.1, § 3, п.Б гл.1, § 3, п.А гл.1, § 2, п.З гл.1, § 3, п.В гл.Ш, § 1, п.Д
II.	Расчет притоков к дренажным штрекам и уровней в зоне их влияния	См. п.1 Особенности расчета	гл.П, § 1, п.Д

1	2	3	4
III.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к дренажным траншеям, канавам, колодцам, зумпфам, стволам и т.п.	См. п.1	
IV.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к водопонижительным скважинам	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Порядок расчета</li> <li>2. Граничные условия</li> <li>3. Расчет водопритоков и уровней в "нормальных" условиях: <ol style="list-style-type: none"> <li>а)при установившемся движении: <ol style="list-style-type: none"> <li>в типовых условиях,</li> <li>в сложных условиях,</li> </ol> </li> <li>б)при неустановившемся движении: <ol style="list-style-type: none"> <li>скважины с постоянным во времени дебитом,</li> <li>скважины с постоянным во времени понижением,</li> <li>разгрузочные скважины в напорных плечах.</li> </ol> </li> </ol> </li> <li>4. Замена контурных и линейных систем скважин фиктивными траншеями</li> <li>5. Переход от формул безнапорной фильтрации к напорной</li> <li>6. Учет напорно-безнапорного характера фильтрации</li> <li>7. Учет инфильтрации</li> <li>8. Учет "перетекания"</li> <li>9. Учет несовершенства</li> <li>10. Учет уклона и волнистости водоупора</li> <li>11. Учет естественного уклона потока</li> <li>12. Учет неоднородности фильтрующей толщи</li> </ol>	<p>гл.1, § 5</p> <p>гл.1, § 1, п.А и гл.П, § 2 (введение)</p> <p>гл.П, § 2, п.А</p> <p>гл.П, § 2, п.Б</p> <p>гл.Ш, § 2, п.А</p> <p>гл.Ш, § 2, п.Б</p> <p>гл.Ш, § 2, п.В</p> <p>гл.1, § 2, п.Е</p> <p>гл.1, § 2 (введение)</p> <p>гл.1, § 2 (введение)</p> <p>гл.1, § 1, п.В и гл.П, § 2, п.В</p> <p>- " -</p> <p>гл.1, § 2, п.М1</p> <p>гл.1, § 3, п.Б</p> <p>гл.1, § 3, п.А</p> <p>гл.1, § 2, п.З</p>



1	2	3	4
		13.Учет промежутков высачивания 14.Учет водозахватной способности 15.Учет наклона скважин 16.Учет "истощения" наклонного водоносного пласта при водо- понижении	гл.1, § 3, п.3 гл.1, § 3, п.7 гл.1, § 2, п.1 гл.1, § 2, п.4
У.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к скважинам и забивным фильтрам	Как для водопонижительных скважин с заданным понижением (см.п.1У)	
У1.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к самоизливающимся и поглощающим скважинам	Как для водопонижительных скважин с заданным понижением (см.п.1У)	
УП.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к горизонтальным скважинам	Расчет в "нормальных" условиях Учет различных дополнительных факторов - аналогично п.1У	гл.1, § 2, п.1
УШ.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к иглофильтрам.	Расчет в "нормальных" условиях Учет различных дополнительных факторов - аналогично п.1У	гл.1, § 2, п.1 гл.1, § 2, п.1

Примечание: "нормальные" условия фильтрации предполагают:

- 1) однородность фильтрующей толщи,
- 2) горизонтальность "водоупора",
- 3) отсутствие скачкообразного (и инерционно-барического) режима фильтрации (или пренебрежимо малое развитие его),
- 4) отсутствие питания по площади,
- 5) совершенство дренажных выработок.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А б р а м о в С.К., Б а б у ш к и н В.Д. Методы расчета притока воды к буровым скважинам. Гостройиздат, 1955.
2. А б р а м о в С.К., С к и р г е л л о О.Б., Ч е л ь ц о в М.И. Осушение шахтных полей и карьеров. Госгортехиздат, 1961.
3. А б р а м о в С.К. и др. Влияние водохранилищ.... ВОДГЕО, М, 1960.
4. А р а з и н В.И., Н у м е р о в С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. Гостехиздат, 1963.
5. Б о р ь с о в Ю.П., Т а б а к о в В.П. Научн.техн.сборник по добыче нефти, № 16, 1962.
6. Б о ч е в е р Ф.М., В е р и г и н Н.Н. Методическое пособие по расчету эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. Гостройиздат, 1961.
7. Б о ч е в е р Ф.М., Я з в и н. Вопросы гидрогеологических расчетов водозаборов и дренажей. ВОДГЕО, М, 1960.
8. Б о ч е в е р Ф.М., Я з в и н. Расчет колонизации в горючих породах, "Техническое строительство" № 6, 1967.
9. Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. Сб.1, Гостройиздат, 1952.
10. Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. Сб.3, Гостройиздат, 1959.
11. Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. Сб.4, Гостройиздат, 1964.
12. В о р о б к о в Л.Н. и др. Водопонижение в гидротехническом строительстве. Гостройиздат, 1960.
13. Гидрогеология и инженерная геология. Сб.№ 9, 1947.
14. Г и р и н с к и и Н.К. К теории фильтрации в подземные выработки. ДАН СССР, 75, № 3, 1947.
15. К е р к и с Е.Е. Определение радиуса влияния при расчете водопритоков. Углетехиздат, 1955.
16. К и м В.Ю. Об одном приближенном методе решения нестационарных задач теории фильтрации. ПМТФ № 1, 1961.

17. К о в л о в В.С. Расчеты дренажных сооружений. Стройиздат, 1940.
18. М а с к е т М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Госстройиздат, 1949.
19. М и р о н е н к о В.А. О применении горизонтальных скважин при дренировании карьеров. Труды ВНИИ. Сб.Х1, УП, 1962.
20. Научные сообщения института ВОДГЕО. Гидрогеология, 1962.
21. П л о т н и к о в Н.И., С ы р о в а т к о М.В., Щ е г о л е в Д.И. Подземные воды рудных месторождений. Metallургиядат, 1957.
22. П о л у б а р и н о в а - К о ч и н а П.Я. Теория движения грунтовых вод. Гостехиздат, 1952.
23. П о л у б а р и н о в а - К о ч и н а П.Я. О наклонных и горизонтальных скважинах конечной длины. Прикл.мат-ка, т.ХХ, 1956.
24. П о л у б а р и н о в а - К о ч и н а П.Я. Известия Сиб.отд. АН СССР, № 5, 1960.
25. Понижение уровня грунтовых вод ЛМУ и ЭИ (инструкция-пособие). ГСИ, М., 1958.
26. Справочное руководство гидрогеолога. Гостоптехиздат, 1959.
27. Труды лаборатории инженерной гидрогеологии, № 4, Гостройиздат, 1962.
28. Труды института ВОДГЕО. Госстройиздат, 1958.
29. Научные сообщения института ВОДГЕО. Гидрогеология, 1962.
30. Ч а р н ы й И.А. Основы подземной гидравлики. Гостоптехиздат, 1950.
31. Ч е к а л о в Э.Б. Метод условного контура пласта. НТС, ВНИИ, № 17, 1962.
32. Ш е с т а к о в В.М. Методика определения участка высачивания. Издание ВОДГЕО, 1955.
33. Ш е с т а к о в В.М. Неустановившаяся фильтрация при наклонном водоупоре. ДАН СССР, т.108, № 5, 1956.
34. Ш е с т а к о в В.М. Расчет фильтрации в трехслойной среде. "Гидротехническое строительство", № 4, 1956.
35. Ш е с т а к о в В.М., П а в л о в с к а я Л.Н. Методические указания по фильтрационным расчетам водопонижительных установок. Госэнергиздат, 1961.

36. Ш е с т а к о в В.М. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн.наук. ВНИИГ, 1968.

37: Щ е л к а ч е в В.Н. Упругий режим пластовых водонапорных систем. Гостехиздат, 1948.

38. Я н к е Е., Э м д е Ф. Таблицы функций. Гостехиздат, 1948.

39. L i e b m a n G. A. New Electrical Analog Method for the solution of Transient Heat Conductor Problems. "Trans.ASME", 1956, vol.78 (перевод в сборник переводов "Механика", 1957, вып.3)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЯЗЫКА ОПЛЫВАНИЯ/28/

Длина языка оплывания определяется по формуле:

$$l_{опл} = \frac{h_B}{J_c} , \quad /A/$$

где  $h_B$  - высота промежутка высачивания,  
 $J_c$  - средний уклон зоны оплывания.

Величину  $J_c$  можно найти из выражения:

$$J_c = \chi \frac{tg \rho}{2} , \quad /B/$$

где  $\chi$  - определяется из графика (рис.34-а) - при  $q_0 \leq 7 \text{ м}^3/\text{сутки}$  на пог.м. или из графика (рис.34-б) - при  $q_0 > 7 \text{ м}^3/\text{сутки}$  на пог.м. ( $q_0$  - удельный расход потока, вытекающего на откос).

Высота промежутка высачивания  $h_B$  определяется по формулам § 3 гл.I, причем в расчет вводится величина условного заложения откоса:

$$m = \frac{5}{tg \rho + 3J_c} . \quad /C/$$

Оплывание песков вызывает осыпание верхней части откоса, ширина зоны осыпания определяется формулой:

$$\Delta l = \frac{h_B^2}{2H} \left( \frac{1}{J_c} - \frac{1}{tg \rho} \right) , \quad /D/$$

где  $H$  - высота откоса.

Пример расчета приведен в приложении № 3.

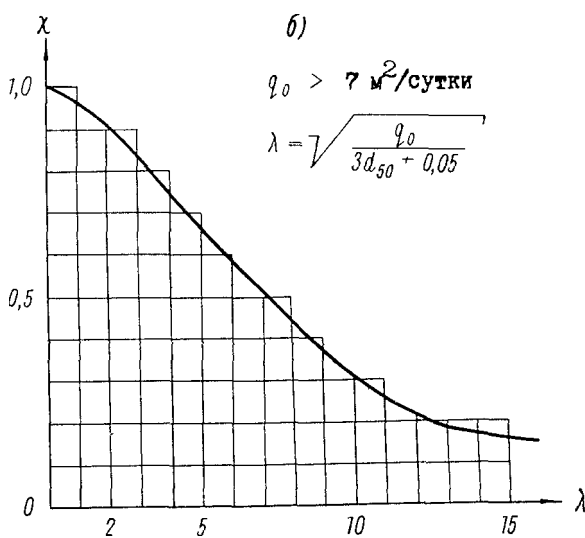
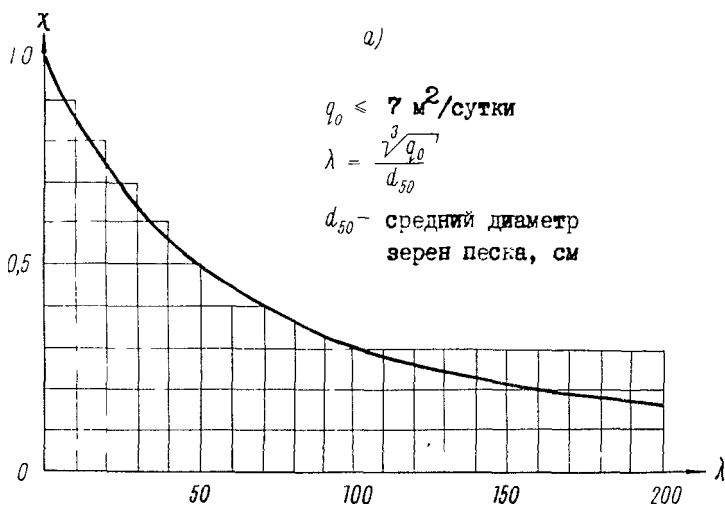


Рис. 34.

Вывести формулу для определения притока к несовершенной траншее, расположенной вблизи карьера (рис.35); в траншее поддерживается постоянный уровень  $h'_2$ .

Вывод проводится в соответствии с гл.1, § 2, п.Ж, 2.

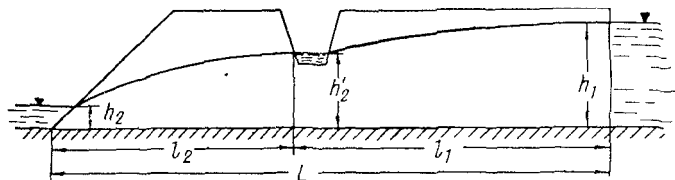


Рис. 35. Схема к расчету несовершенной траншеи вблизи карьера

1. Несовершенная траншея заменяется совершенной с фиктивным уровнем воды в ней  $h'_{2ф}$ , определяемым по формуле (1.25), и погонным притоком  $q$ .

2. Расход потока, притекающего к совершенной траншее со стороны области питания:

$$q_1 = \frac{k(h_1^2 - h'^2_{2ф})}{2l_1}$$

Расход потока, выходящего в котлован.

$$q_{пр} = \frac{k(h'^2_{2ф} - h_2^2)}{2l_2}$$

3. Составляется балансовое уравнение потока на линии траншеи:

$$q_1 = q + q_{пр} \quad \text{или} \quad \frac{k(h_1^2 - h'^2_{2ф})}{2l_1} = \frac{k(h'^2_{2ф} - h_2^2)}{2l_2} + q$$

Подставляя в это уравнение выражение для  $h'_{2ф}$ , получаем уравнение относительно  $q$ :

$$q = \frac{k}{2} \frac{\left[ \frac{l_2}{L} (h_1^2 - h_2^2) + h_2^2 - h'^2_2 \right]}{\frac{l_1 l_2}{L} + 0,73 h'_2 l_2 \frac{h'_2}{\pi r_{эф}}}$$

Определить требуемое число скважин на участке контурного дренажа карьера. Рассчитать уровень в точке М (рис.36) и построить депрессионную кривую по линии скважин.

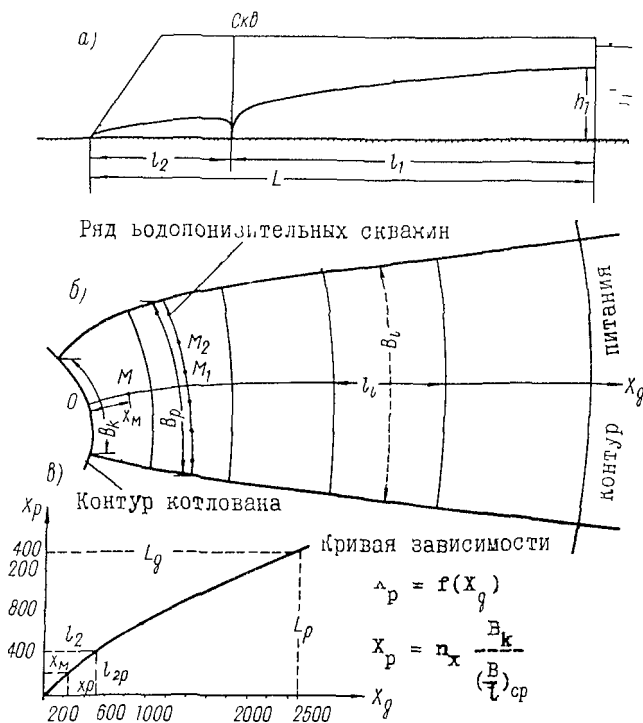


Рис. 36. Схема к расчету ряда водопонижительных скважин вблизи карьера

Исходные данные:

$k = 10 \text{ м/сут.}$ ,  $h_1 = 50 \text{ м}$ ,  $h_2 = 0$ ,  $h_c = 0$ ,  $d_{50} = 0,25 \text{ мм}$ ,  
 $\rho = 34^\circ$ ,  $d_c = 0,3 \text{ м}$ ,  $l_\phi = 10 \text{ м}$ ,  $B_k = 550 \text{ м}$ ,  $B_p = 880 \text{ м}$ ,  
 $l_1 = 2000 \text{ м}$ ,  $l_2 = 500 \text{ м}$ ,  $\lambda_M = 220 \text{ м}$ ,  $L = 2500 \text{ м}$ ,

допустимая длина языка оплывания ( $l_{\text{опл.доп.}}$ ) составляет 5 м.

Предварительно для решения задачи построена сетка движения и выделены характерные ленты тока, одна из которых показана на рис.36. В пределах этой ленты тока располагается участок дренажного контура



расчет которого производится следующим образом (гл.1, § 5 и гл.П, § 2, Б п.2).

1. Выделенную ленту тока приводим к плоской по формуле (1.2) посредством введения расчетной длины пути фильтрации

$$L_p = 5 \cdot \frac{550}{2,02} = 1370 \text{ м.}$$

По формуле (1,3) строим кривую зависимости расчетных длин пути фильтрации от действительных длин (рис.36). Пользуясь этой кривой, находим расчетные величины  $l_{2p} = 400 \text{ м}$ ,  $l_{1p} = 970 \text{ м}$  и  $x_p = 200 \text{ м}$ , отвечающие действительным величинам  $l_1$ ,  $l_2$  и  $x_m$ .

2. Определяем расход потока  $q_0^0$ , выходящего на откос, допустимый с точки зрения фильтрационных деформаций. Для этого воспользуемся методикой В.М.Шестакова (см.приложение F 1) и построим график зависимости оплывания от выходного расхода  $q_0$ . С этой целью задаемся несколькими произвольными значениями  $q_0$ . Пусть  $q_{01} = 2 \text{ м}^3/\text{сут.}$  на 1 п.м. Пользуясь графиком (рис.34а), определяем величину  $\chi$  в зависимости от  $\lambda = \frac{\sqrt{t_0}}{2} = 0,025$   $= 50,4$ ;  $\chi = 0,49$ . По формуле (B)

$$J_{cp} = 0,49 \frac{t_0}{2} = 0,165.$$

Затем рассчитываем величину условного заложения откоса (C)

$$m = \frac{5}{t_0 \cdot 34^0 + 3,0,165} = 4,27$$

и определяем высоту промежутка высачивания по формуле (1.33)

$h_0 = \frac{2}{10} (4,27 + 0,5) = 0,95 \text{ м}$ . Согласно формуле (A) длина языка оплывания при расходе  $q_{01} = 2 \text{ м}^3/\text{сут}$  на 1 п.м., составляет  $l_{опл} = \frac{0,95}{0,165} = 5,8 \text{ м}$ .

Аналогично проводится расчет оплывания и для  $q_{02} = 1,5 \text{ м}^3/\text{сут}$  и  $q_{03} = 1 \text{ м}^3/\text{сут}$  на 1 п.м.

Строится график зависимости  $q_0 = f(l_{опл})$  (рис.37-а). Пользуясь графиком, определяем для заданной допустимой величины оплывания (5 м) допустимый расход выходящего на откос потока  $q_0^0 = 1,8 \text{ м}^3/\text{сут}$  на 1 п.м.

3. Определяем единичный приток к откосу при отсутствии скважин, для чего используем формулу (1.1) при  $L = L_p$ .

$$q = 10 \frac{50^2}{2 \cdot 1370} = 9,1 \text{ м}^3/\text{сут. на пог.м.}$$

4. Исходя из требуемого коэффициента заслона (гл.1, § 5, п.6-а)

$$\delta = 1 - \frac{q_0^0}{q_0} = \frac{1,8}{9,1} = 20,3\%$$

по графику рис.9 приближенно определяем требуемое расчетное расстояние между скважинами  $\sigma_p$ , которое при  $l_{2p} = 400$  м составляет 80 м.

Число скважин на участке

$$n_y = \frac{B_k}{\sigma} = \frac{550}{80} = 7 \text{ скв.}$$

Общий приток к участку котлована  $Q_y = B_k q = 550 \cdot 9,1 = 5000 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Расход скважины составит  $Q_c = \frac{Q_y}{n} = (5000 : 7) \cdot 0,803 = 573 \text{ м}^3/\text{сут} = 23,8 \text{ м}^3/\text{час.}$

5. Далее проведем уточняющий расчет числа скважин на участке водопонижительного контура.

Задаваясь величинами

$\sigma_p = 75$  м, 90 м и 100 м, по формулам (П.34) и (П.35) определим расходы скважины  $Q_c$  и выходящие на откос расходы  $q_0$ .

$$\begin{aligned} \text{При } \sigma_p = 75 \text{ м } Q_c &= \frac{10}{2} \cdot \left[ \frac{400}{1370} (50^2) - \frac{400 \cdot 970}{75 \cdot 1370} + 0,367 \lg \frac{75}{2,3, 14,0, 15} \right] = \\ &= 817 \text{ м}^3/\text{сут} = 34 \text{ м}^3/\text{час}; \\ q_0 &= 10 \frac{50^2}{2 \cdot 1370} - 817 \cdot \frac{970}{75 \cdot 1370} = 1,4 \text{ м}^3/\text{сут на п.м.} \end{aligned}$$

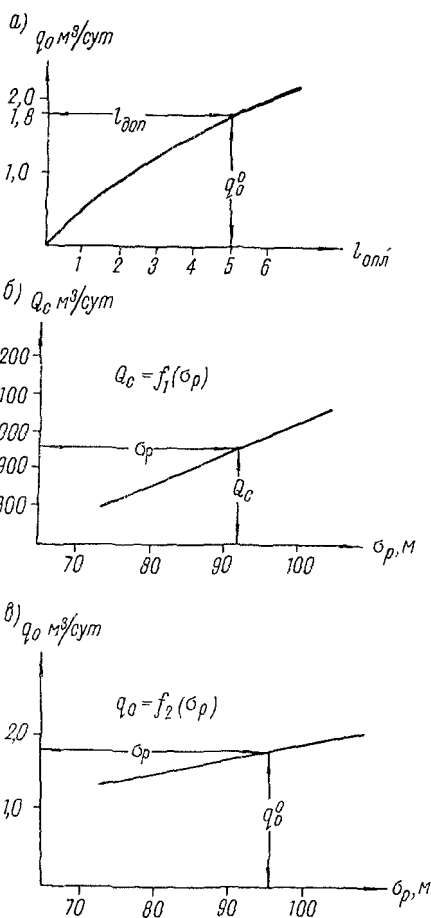


Рис. 37.

при  $\sigma_p = 90 \text{ м}$   $Q_c = 944 \text{ м}^3/\text{сут} = 39,4 \text{ м}^3/\text{час}$ ,  $q_0 = 1,7 \text{ м}^3/\text{сут}$  на п.м.

При  $\sigma_p = 100 \text{ м}$   $Q_c = 1022 \text{ м}^3/\text{сут} = 42,6 \text{ м}^3/\text{час}$ ,  $q_0 = 1,87 \text{ м}^3/\text{сут}$  на п.м.

По рассчитанным величинам  $Q_c$  и  $q_0$  при заданных  $\sigma_p$  строим графики зависимостей  $Q_c = f_1(\sigma_p)$  и  $q_0 = f_2(\sigma_p)$  (рис.37-б, в).

Исходя из допустимого значения  $q_0^0 = 1,8 \text{ м}^3/\text{сут}$  на п.м, пользуясь графиком  $q_0 = f_2(\sigma_p)$ , подбираем соответствующее значение  $\sigma_p = 95 \text{ м}$ , а затем по графику  $Q_c = f_1(\sigma_p)$  находим  $Q_c = 990 \text{ м}^3/\text{сут} = 41,3 \text{ м}^3/\text{час}$  при  $\sigma_p = 95 \text{ м}$ . Выбираем  $Q_n = 40 \text{ м}^3/\text{час} = 960 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

При  $Q_c = Q_n = 960 \text{ м}^3/\text{сут}$  расчетное расстояние между скважинами (рис.37-б) составит 92 м. Число скважин на участке в пределах ленты тока шириной  $B_k = 550 \text{ м}$  —  $n_y = \frac{550}{92} = 6$  скв. Действительное расстояние между скважинами  $\sigma$  на участке контура  $B_r$  длиной 880 м (рис.36). составит  $\sigma = \frac{880}{6} = 146 \text{ м}$ .

6. Для обеспечения работы скважины с дебитом  $Q_c = Q_n$  необходимо соблюдать условие  $Q_n \leq Q_{вз}$  (гл. II, § 2).

Проверим водозахватную способность скважин в наших условиях, при длине рабочей части фильтра  $l_{\phi} = 10 \text{ м}$ . По формулам (1.39) и (1.40)  $v = 65 \sqrt{10} = 140 \text{ м}/\text{сут}$ ;  $Q_{вз} = 2,3, 14,0, 15, 10, 140 = 1320 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Таким образом, требуемое условие соблюдается.

7. Рассчитаем уровень в точке М, расположенной на расстоянии  $x_M = 220 \text{ м}$  от котлована. Расчетное расстояние до точки М  $x_p = 200 \text{ м}$  (см. график на рис.36). Для этого заменяем ряд скважин фиктивной сплошной дреной (траншеей) и вводим условную (расчетную) глубину потока  $h_{\phi}$  (гл. I § 2, п.Е).

$$\text{По формуле (1.18)} \quad h_{\phi} = \sqrt{\frac{960}{3,14 \cdot 10} \ln \frac{92}{3,14 \cdot 0,3}} = 11,5 \text{ м}.$$

Уровень в точке М можно определить из балансового соотношения:

$$\frac{k(h_{\phi}^2 - h_M^2)}{2(l_{2p} - l_{xp})} = \frac{k(h_{\phi}^2 - h_l^2)}{2l_{2p}},$$

$$h_M = \sqrt{11,5^2 - \frac{11,5^2 (400 - 200)}{400}} = 8,2 \text{ м}.$$

8. Для построения депрессионной кривой по линии скважин определим уровни в нескольких точках:

а) высота высачивания  $h_0$  в скважине определяется по формуле (1.38) при  $-\frac{Q_c}{K} = \frac{960}{10} = 96$  и уровне воды в скважине  $h_c = 0$ ; в наших условиях  $h_0 = 9$  м;

б) уровни в точке  $M_1$ , удаленной от скважины на расстояние  $y = 30$  м, и в точке  $M_2$  - посередине между скважинами, определяются по формуле (1.21) при подстановке в нее действительных расстояний до точек и действительных величин  $Q$ :

$$h_{M_1} = \sqrt{11,5^2 - \frac{2 \cdot 960}{10} \left[ -\frac{1}{2\pi} \ln \left( 2 \sin \frac{\pi \cdot 30}{146} \right) \right]} = 11,8 \text{ м}$$

$$h_{M_2} = \sqrt{11,5^2 - \frac{2 \cdot 960}{10} (-0,11)} = 12,4 \text{ м}.$$

Определить приток в участок карьера, расположенного у реки, в различные моменты времени. Ближайшее расстояние от карьера до реки  $R_{д.мин} = 500$  м;  $k = 10$  м/сут;  $\mu = 0,25$ ; глубина потока на контуре реки  $h_1 = 50$  м, на контуре карьера —  $h_2 = 0$ ;  $t = 180$  сут, 720 сут, 1800 сут.

Расчет ведем в соответствии с гл. III, § 1, А, п. 3.

1) Построим на приборе ЭГДА сетку движения при установившемся режиме и выделим расчетные ленты тока. Одна из таких лент показана на рис. 38; ее параметры  $L = R_{д.мин} = 2500$  м,  $B_L = 500$  м; на этом же чертеже показаны гидроизогипсы "естественного" (до начала работы карьера) потока.

2) Определим время  $t_{0 мин}$ , при котором практически начинается сказываться влияние реки на величины притоков в карьер. Для этого сначала вычислим коэффициент уравнипроводности  $\alpha$  (см. гл. III, § 1, п. Е):

$$h_{ср} = \frac{1}{3} (h + h_1 + h_2) = \frac{1}{3} (47,5 + 50) = 33 \text{ м};$$

$$\alpha = \frac{10 \cdot 33}{0,25} = 1320 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

$$\text{Определим } t_{0 мин} = \frac{R_{д.мин}^2}{\pi \alpha} = \frac{500 \cdot 500}{3,14 \cdot 1320} \approx 60 \text{ суток}.$$

Таким образом, по условиям задачи расчеты надо провести при  $t_1 > t_{0 мин}$ .

3) Определяем время  $t_2 = \frac{R_L^2}{\pi \alpha}$ , в течение которого условная воронка депрессии дойдет до реки (в пределах ленты):

$$t_2 = \frac{2500^2}{3,14 \cdot 1320} \approx 1500 \text{ суток}$$

4) В пределах выделенной лентой тока определяем положение условного контура питания на момент времени  $t_1 = 180$  сут. (рис. 38-а).

По формуле (1.10)  $R(t) = \sqrt{3,14 \cdot 1320 \cdot 180} = 830$  м.

5) Выделенный участок планового потока на момент времени  $t_1 = 180$  сут. приводим к плоскому (рис. 38) по формуле (1.2):

$$L_{р1} = 2 \cdot \frac{550}{1,82} \approx 605 \text{ м}.$$

6) Удельный приток в участок карьера в момент времени  $t_1 = 180$  сут. вычисляем по формуле (1.1), где  $L = L_{р1}$ , а  $h_1$  — естественная глубина потока на условном контуре питания, определенная по

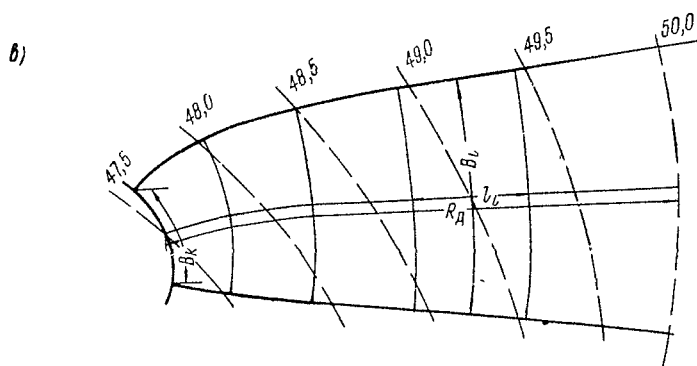
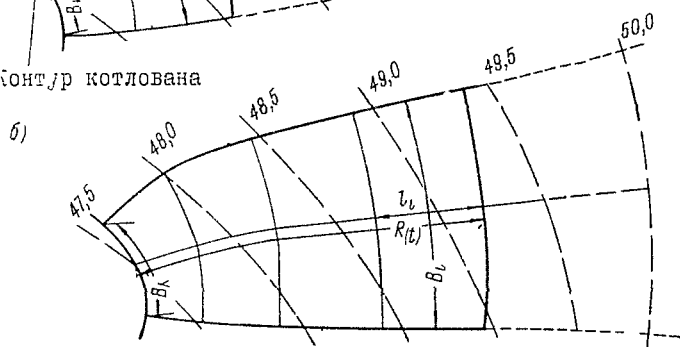
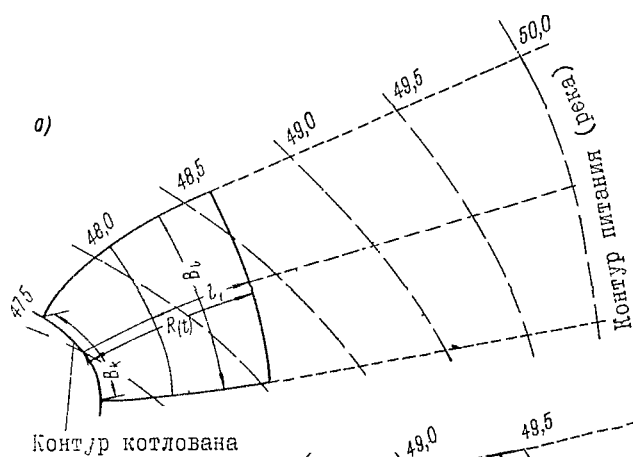


Рис.38. Схема к расчету притоков к участку карьера  
методом "недеформируемых линий тока"

"естественным" гидроизогипсам ( $h_1 = 48,36 \text{ м}$ );

$$q_1 = \frac{10 \cdot 48,36^2}{2 \cdot 605} = 19,4 \text{ м}^3/\text{сут на 1 пог.м.}$$

7) Аналогично проводим расчет на момент времени  $t_1 = 720 \text{ сут.}$

При этом получаем:  $R_d = 1920 \text{ м}$ ,  $h_1 = 49,20 \text{ м}$ ,  $L_{p1} = 1050 \text{ м}$ ,

$$q_1 = 11,5 \text{ м}^3/\text{сут на 1 пог.м.}$$

8) Расход в пределах ленты тока при  $t_1 = 1800 \text{ сут}$  можно рассчитать по формуле установившегося режима (стр. 18), приводя ленту длиной  $R_d = 2500 \text{ м}$  к плоской, с расчетной длиной  $L_p =$

$$= 5 \frac{550}{2,02} = 1370 \text{ м:}$$

$$q_{\text{уст}} = \frac{10 \cdot 50^2}{2 \cdot 1370} = 9,1 \text{ м}^3/\text{сут на пог.м.}$$