МИНИСТЕРСТВО УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА (ВНИМИ)
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНЫЙ
ИНСТИТУТ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (УкрНИИпроект)

РУКОВОДСТВО

ПО ДРЕНИРОВАНИЮ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

Раздел III

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ
ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

Раздел IV

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИ РАСЧЕТАХ ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

Ленинград 1968

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА (ВНИМИ)
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНЫЙ
ИНСТИТУТ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (УкрНИИпроект)

РУКОВОДСТВО

ПО ДРЕНИРОВАНИЮ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

Раздел III

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ
ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

Раздел IV

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИ РАСЧЕТАХ ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

Ленинград 1968

А Н Н О Т А Ц И Я

В "Руководстве" изложена методика фильтрационных расчетов и аналогового моделирования применительно к обоснованию схем осушения месторождений полезных ископаемых, осваиваемых открытым способом. Работа базируется на анализе общих методов подземной гидродинамики и отдельных частных решений, предложенных различными авторами, а также на анализе большого числа проектов осушения карьеров. "Руководство" предназначается для использования при проектировании, строительстве и эксплуатации карьеров, а также при разведке месторождений, намечаемых к открытой разработке.

В составлении Ш и 1У разделов "Руководства" принимали участие; от ВНИМИ - доктор геолого-минералогических наук Мироненко В.А., кандидат геолого-минералогических наук Норватов Ю.А., инж. Бокий Л.Л.; от института "Укрниипроект" - доктор геолого-минералогических наук Жернов И.Е., кандидат геолого-минералогических наук Устинов С.А., инж. Спивак О.А.

Раздел III

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных этапов проектирования осушительных систем на карьерах является проведение фильтрационных расчетов: правильный выбор расчетной схемы, отвечающей гидрогеологической и горно-технической обстановке, является необходимым условием для обоснования эффективных дренажных мероприятий. Несмотря на это, как показывает проведенный анализ проектов осушения большого числа карьеров (около 50), в них нередко используются расчетные методы и формулы, непригодные для рассматриваемых гидрогеологических условий, а в ряде случаев – вообще неверные формулы. Стремясь к использованию наиболее простых расчетных зависимостей, проектировщики иногда прибегают к такой схематизации условий фильтрации, при которой расчеты теряют всякую ценность.

Наряду с факторами субъективного характера, погрешности фильтрационных расчетов обусловлены и рядом объективных причин; остановимся на наиболее важных из них.

1. До последнего времени не было сводной работы, в которой полученные различными авторами решения фильтрационных задач были бы обобщены применительно к расчетам осушения карьерных полей.

2. Большинство справочников и пособий по фильтрационным расчетам осушения горных выработок строится лишь по принципу набора отдельных формул, многие из которых применимы в очень узком круге гидрогеологических условий. При такой постановке вопроса упускаются из вида общие методы фильтрационных расчетов, позволяющие выработать наиболее универсальные приемы решения различных задач. Важно подчеркнуть, что многие из этих общих методов не требуют специальной математической подготовки и могут, в силу этого, всесторонне использоваться специалистами-гидрогеологами. Среди этих методов следует, прежде всего, назвать метод сложения течений, метод отражения, метод недеформируемых линий тока, метод эквивалентных фильтра-

ционных сопротивлений и метод фрагментов.

3. Многие задачи фильтрации, имеющие важное значение для расчетов осушения карьерных полей, не получили еще достаточного освещения в специальной литературе. В частности, можно упомянуть следующие задачи:

а) о неустановившейся фильтрации к выработкам и системам скважин, работающим с постоянным понижением;

б) о притоке к горизонтальным скважинам, проходимым из карьера;

в) об учете влияния движения борта карьера;

г) о напорно-безнапорной неустановившейся фильтрации;

д) об учете постепенного снижения уровня на контуре карьера;

е) о неустановившейся безнапорной фильтрации в условиях постепенного истощения водоносных пластов.

4. При рассмотрении в специальной литературе вопросов фильтрационных расчетов осушения карьеров, совершенно недостаточное внимание уделяется применению аналогового моделирования. Между тем, можно с полным основанием утверждать, что система осушения карьера лишь в очень редких случаях может быть обоснована без привлечения моделирования.

В связи с этим, в настоящей работе излагаются рекомендации по методике фильтрационных расчетов осушения карьерных полей, построенные на сочетании аналитических и экспериментальных методов, причем приняты во внимание как ранее полученные результаты, так и некоторые новые решения. При этом сознательно опущены те решения, которые (из-за стремления к излишней, с точки зрения исходных параметров, точности) являются чрезмерно громоздкими и неудобными для практического использования.

Условные обозначения:

x, y – прямоугольные координаты на плоскости;
r – координата при осесимметричном движении;
k – коэффициент фильтрации;
μ – водоотдача;
$H(h)$ – напор (при безнапорном движении – глубина /мощность/ потока);
$H_0(h_0)$ – 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;
$H_{oc}(h_{oc})$ – первоначальный напор (глубина) в скважине;
h_b – высота промежутка высачивания;
h_k – глубина воды в затопленном котловане;
$H_\phi(h_\phi)$ – средний напор (глубина) на линии ряда скважин;
m – мощность напорного горизонта;
Q_0 – дебит водопонизительной установки;
Q_k – общий приток к котловану;
$Q_н$ – 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;
w – интенсивность инфильтрации;
a – коэффициент уровнепроводности;
a^* – коэффициент пьезопроводности;
S – понижение уровня подземных вод;
S_c – понижение уровня в дренажной скважине;
R – расчетный радиус влияния;
$R_ж$ – минимальное (действительное) расстояние от выработки до контура питания;
r_c – радиус скважины;
d_c – диаметр скважины;
r_k – приведенный радиус котлована или водопонизительного контура;

δ – расстояние между скважинами (выработками);

F, P – площадь и периметр дренажного контура или котлована (на высоте промежутка высачивания);

l_1, l_2 – расстояния от дрены (или от центра котлована), соответственно, до областей питания и стока;

δ – расстояние от центра дрены до центра круговой области питания;

a и b – длина и ширина дренажного контура (карьера), в частном случае b – ширина дренажной траншеи;

T – расстояние от дна несовершенной выработки до водоупора.

Примечание: большинство формул приводятся для условий безнапорной фильтрации. Для перехода к соответствующим формулам напорного движения следует заменить выражение $(h_0^2 - h^2)$ на выражение $2mS$, а коэффициент уровнепроводности α на коэффициент пьезопроводности α^*.

Сводная таблица – указатель составных элементов расчета

№ п.п.	Цель расчета	Составные элементы расчета	Соответствующий раздел текста
1	2	3	4
1.	Расчет притоков к карьеру и уровней в зоне его влияния	1. Исходные данные	гл.1 § 3
		2. Выбор расчетной схемы	гл.1 § 4
		3. Граничные условия	гл.1 §§ 3 и 4
		4. Учет неоднородности фильтрующей толщи	гл.II § 5
		5. Общий порядок расчета	гл.1 § 5
		6. Переход от формул безнапорной фильтрации к напорной	Примечание к условным обозначениям

1	2	3	4
		7. Расчет водопритоков и уровней в типовых условиях:	
		а) при установившемся движении,	гл.1У § 1
		б) при неустановившемся движении	гл.1У § 3
		8. Расчет в сложных условиях:	
		а) при установившемся движении,	гл.1У § 2
		б) при неустановившемся движении	гл.1У § 4
		9. Учет инфильтрации	гл.1 § 4, п.3 гл.1У § 1 п.Б1 и § 4 п.А5
		10. Учет перетекания	гл.1 § 4 п.3, гл.1У § 1 п.Б2 и § 4 п.А5
		11. Учет уклона и волнистости водоупора	гл.П § 7 и гл.1У § 5 п.Д
		12. Учет напорно-безнапорного характера фильтрации	гл.П § 6
		13. Определение приведенного радиуса выработки (контура)	гл.П § 4
		14. Учет несовершенства	гл.Ш § 2 п.Б и п.В

1	2	3	4
		15. Учет промежутков высачивания	гл. Ш,§ 3
		16. Учет подвижности борта	гл.1У,§ 5 п.Б
		17. Учет снижения уровня воды в котловане (карьере)	гл.1У, §5 п.А
		18. Расчет суммарного притока к карьеру при прорыве напорного горизонта.	гл.1У, § 5 п.В
		19. Учет снижения уровня воды (напоров) за счет выемки пород.	гл.1У, § 5 п.Г
II.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к дренажным траншеям, канавам и т.п.	Общий случай расчета	см. п.1
		Учет взаимодействия параллельных выработок	гл.У1 § 1 п.Б
Ш.	Расчет притоков к дренажным штрекам и уровней в зоне их влияния	См. п. II	
		Особенности расчета в условиях слоистой толщи	гл.У1, §2 п.2
1У.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к водопонижающим скважинам.	1. Исходные данные	гл. 1, § 3
		2. Выбор расчетной схемы	гл. 1, § 4
		3. Граничные условия	гл. 1, § 4
		4. Учет неоднородности фильтрующей толщи	гл. П,§5
		5. Общий порядок расчета	гл. 1, § 5
		6. Переход от формул безнапорной фильтрации к напорной	Примечание к условным обозначениям

1	2	3	4
		7. Расчет водопритоков и уровней в типовых условиях:	
		а) при установившемся движении,	гл.У § 1
		б) при неустановившемся движении:	гл.У § 3
		скважины с постоянным во времени дебитом,	гл.У § 3 п.А
		скважины с постоянным во времени понижением	гл.У § 3 п.Б
		8. Расчет в сложных условиях:	
		а) при установившейся фильтрации,	гл.У § 2
		б) при неустановившейся фильтрации:	гл.У § 4
		скважины с постоянным дебитом,	гл.У § 4 п.А
		скважины с постоянным понижением	гл.У § 4 п.Б
		9. Учет инфильтрации	гл.1 § 4 и гл.У § 3 п.В
		10. Учет перетекания	гл.1 § 4, гл.У § 1 п.5 гл.У § 3 п.В
		11. Учет уклона и волнистости водоупора.	гл.II § 7 и гл.У § 4, п.А5
		12. Учет напорно-безнапорного характера фильтрации.	гл.II § 6

1	2	3	4
		13. Замена контурных и линейных систем скважин фиктивными траншеями	гл.Ш § 1
		14. Определение приведенного радиуса установки	гл.П § 4
		15. Учет несовершенства	гл.Ш § 2 п.А
		16. Учет промежутков высачивания.	гл.Ш § 3
		17. Учет водозахватной способности.	гл.Ш § 5
		18. Учет наклона скважин	Сноска на стр.79
		19. Учет вакуумирования	гл.У1 § 4 п.1
		20. Учет сопротивления фильтра.	гл.Ш § 4.
У.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к сквозным и забивным фильтрам	Как для водопонижающих скважин с заданным понижением (см.п.1У)	
У1.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к самоизливающим и поглощающим скважинам.	Как для водопонижающих скважин с заданным понижением (см.п.1У)	
		Учет влияния гравийно-песчаного заполнителя	гл.Ш § 4

1	2	3	4
УП	Расчет притоков и уровней при фильтрации к горизонтальным скважинам		гл.У1 § 3
УШ.	Расчет притоков и уровней при фильтрации к иглофильтрам.		гл.У1 § 4 п.Г

Примечание: понятие о типовых и сложных схемах изложено в гл.1 § 4 п.6.

Г Л А В А 1.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ

§ 1. Гидродинамическая характеристика процесса осушения

1. С гидродинамической точки зрения, осушение месторождения является процессом формирования режима подземных вод в зоне действия карьера и его дренажной системы. Различают три стадии развития этого процесса:

а) стадия неупорядоченного (резко неустановившегося) режима;

б) стадия упорядоченного (квазистационарного) режима;

в) стадия установившегося режима.

2. В первый период строительства карьера, вследствие сравнительно быстрого понижения напоров и неодновременного включения дренажных устройств, фильтрация отвечает

стадии неупорядоченного режима. Однако, ввиду относительной кратковременности этой стадии, фильтрационные расчеты осушения карьерных полей в большинстве случаев, представляющих практический интерес, могут проводиться применительно к стадии квазистационарного, а позднее- и стационарного режима.

3. Упорядоченный характер движения подземных вод на стадии квазистационарного режима позволяет ввести в расчеты существенные упрощения и учитывать изменения параметров потока во времени посредством приближенных (инженерных)методов, таких, как метод недеформируемых линий тока, метод последовательной смены стационарных состояний, метод фильтрационных сопротивлений, метод условного радиуса влияния и др.

4. Расчеты применительно к стадии неупорядоченного режима могли бы иметь практический смысл (в условиях осушения карьерных полей) преимущественно для оценки притоков к дренажным устройствам в пусковой период.Однако, эти расчеты обычно требуют использования более точных зависимостей теории неустановившейся фильтрации, полученных только для нескольких частных случаев.

§ 2. Задачи фильтрационных расчетов процесса осушения

1. Общая задача фильтрационных расчетов осушения карьерного поля заключается в прогнозе режима подземных вод при открытой разработке месторождения, а также в количественном обосновании системы осушения.

2. Частными задачами фильтрационных расчетов осушения карьерного поля являются:

а) определение общего притока вод к карьеру в периоды строительства и эксплуатации на различные моменты времени;

б) обоснование необходимости осушительных меропри-

тий;

в) обоснование типа и количества осушительных устройств, расположения их в плане и разрезе, а также режима их работы во времени;

г) установление положения уровней подземных вод в зоне действия водозаборов во времени.

3. В результате выполнения фильтрационных расчетов устанавливаются объемы и сроки проведения осушительных работ при разных схемах осушения, которые необходимы для составления сметно-финансовых расчетов и технико-экономического сопоставления конкурирующих вариантов систем осушения.

§ 3. Основные исходные данные для фильтрационного расчета и составление природной гидрогеологической схемы

1. Основными исходными данными при фильтрационных расчетах осушения карьерного поля являются:

а) сведения об орогидрографии района;

б) материалы о геологическом строении района;

в) материалы о гидрогеологическом строении района (основные водоносные горизонты, их распространение, уклон водоупора, значения мощностей и напоров и т.д.);

г) фильтрационные параметры (коэффициенты фильтрации, коэффициенты уровнепроводности и пьезопроводности, водоотдача);

д) данные об условиях питания и разгрузки водоносных горизонтов: положение контуров питания и стока, сведения об инфильтрационном питании, сведения о гидравлической взаимосвязи водоносных горизонтов между собой (параметры перетекания) и с поверхностными водоемами;

е) данные о проницаемости покровных отложений на тех участках, где возможна дополнительная инфильтрация;

ж) количество выпадающих атмосферных осадков, величина испарения;

з) инженерно-геологическая характеристика пород;

и) сведения о горных работах (развитие карьера в глубину и по площади, применяемое горное оборудование, график ведения горных работ и т.п.).

2. В тех случаях, когда величины параметров a или a^* не получены опытным путем, их определяют расчетом:

а) коэффициент уровнепроводности определяется по формуле /6/:

$$a = \frac{k h_{ср}}{\mu}, \qquad (1.1)$$

где $h_{ср}$ – средняя во времени и в пространстве мощность безнапорного фильтрационного потока:

$$h_{ср} = \frac{h_2' + h_2'' + h_1' + h_1''}{4}, \qquad (1.2)$$

h_2' и h_2'' – первоначальная и сниженная глубины потока на контуре дренажа; h_1' и h_1'' – то же на контуре питания;

б) коэффициент пьезопроводности может быть определен по формуле В.Н.Щелкачева /31/:

$$a^* = \frac{k}{\gamma \beta_{упр}} = \frac{k m}{\mu_{упр}}, \qquad (1.3)$$

где

$$\mu_{упр} = \gamma \beta_{упр} \cdot m \qquad (1.4)$$

$$\beta_{упр} = \frac{1}{1+\varepsilon}\left(\frac{\varepsilon}{E_b} + a_y\right), \qquad (1.5)$$

γ – объемный вес воды;
$\mu_{упр}$ – коэффициент упругой водоотдачи пласта;
$\beta_{упр}$ – коэффициент упругоемкости пласта;
ε – коэффициент пористости грунта в естественных условиях;

$E_в$ – модуль упругости воды ($E_в \approx 2{,}2 \cdot 10^4$ кг/см^2);
$a_у$ – коэффициент уплотнения грунта в интервале от естественных нагрузок до нагрузок, соответствующих сниженным напорам.

3. Для выбора исходных данных материалы по каждому водоносному горизонту представляются в виде специальных гидрогеологических карт, таких, как карты гипсометрии водоупорного ложа, карты гидроизогипс (пьезоизогипс), карты изомощностей обводненных пород, карты изменения водопроницаемости (коэффициентов фильтрации) и др. Кроме карт, составляется несколько характерных гидрогеологических разрезов по месторождению, с нанесением имеющихся исходных данных. Сведения о горных работах обычно иллюстрируются планом горных работ и паспортом ведения горных работ.

4. На основании анализа всех исходных данных о месторождении составляется природная гидрогеологическая схема области фильтрации: устанавливаются ее границы в плане и в разрезе и краевые условия в природной обстановке.

а. Границами области фильтрации в плане могут служить река или водоем, гидравлически тесно связанные с подземными водами; линия контакта обводненных пород с пластом значительно большей проводимости (в 20–40 и более раз), геологические запасы подземных вод которого весьма велики и т.п. Нередко границами являются различные тектонические нарушения: зона разлома, где происходит обильное питание или разгрузка подземных вод, линия сброса, где обводненные породы контактируют с неводоносными или малопроницаемыми породами и т.п. В долинах рек границами области фильтрации могут служить не только сами реки, но и линии контакта террасовых отложений с коренными.

б. На боковых границах пласта могут иметь место граничные условия четырех видов:

1) граничные условия 1 рода, определяемые значением напора:

$$H_1 = f_1(t) \qquad \text{или} \qquad H_1 = \text{const} \quad ;$$

2) граничные условия II рода, определяемые значением удельного расхода: $q = f_2(t)$ или $q = const$;

3) граничные условия III рода, выражающие связь между удельным расходом и напором: $q(t) = A \cdot H(t) + B$, где A и B – постоянные величины;

4) граничные условия четвертого рода, определяемые равенством напоров и расходов с обеих сторон от границы.

Граничные условия I рода соблюдаются, например, на границе пласта с водоемом или рекой, воды которых гидравлически тесно связаны с подземными водами (так называемый контур обеспеченного питания).

Граничные условия II рода могут соблюдаться на границе пласта, вдоль которой осуществляется свободный перелив подземных вод из другого водоносного горизонта, а также в том случае, когда эта граница является водонепроницаемой ($q = 0$).

Граничные условия III рода могут иметь место на границе пласта с водоемом или рекой, при наличии слабопроницаемых экранов в их русле. В этом случае поступление воды из водоема (или, наоборот, в водоем) определяется разностью между отметкой зеркала водоема и средним напором на его урезе.

Граничные условия IV рода отмечаются на контакте двух водоносных горизонтов с различными проводимостями.

в. Для схематизации строения области фильтрации в разрезе по каждому водоносному и слабопроницаемому пласту устанавливаются средние величины мощностей и коэффициентов фильтрации, как для всей области фильтрации, так и для отдельных зон – при значительной изменчивости этих показателей в плане. После установления средних показателей выделяются пласты, которые можно рассматривать как относительные водоупоры; критерием в этом отношении является соотношение проводимостей (гл.II § 5).

г. Условия на поверхности безнапорного водоносного горизонта определяются величиной инфильтрационного пи-

тания и обычно являются условиями II рода. Подошва безнапорного водоносного горизонта, кровля и подошва напорного горизонта могут быть представлены слабопроницаемыми слоями большой мощности, которые практически являются водоупорными, т.е. здесь будет выполняться граничное условие II рода ($q = 0$). При фильтрации воды через слабопроницаемый слой, разделяющий в разрезе два водоносных горизонта, на контакте имеет место граничное условие III рода: расход перетекания является линейной функцией разности напоров.

§ 4. Типизация условий фильтрации и определение общей расчетной схемы

Общая расчетная гидрогеологическая схема составляется после предварительной типизации исходных условий фильтрации. Такая типизация основывается на природной гидрогеологической схеме (§ 3) и на сведениях о системе осушения; при этом принимаются во внимание:

а) форма области фильтрации в плане и условия на ее боковых границах;

б) строение области фильтрации в разрезе;

в) условия питания и стока по площади распространения водоносных пластов;

г) тип и расположение котлована (карьера) и дренажных устройств, представляющих собой так называемые внутренние границы пластов.

1. По форме области фильтрации в плане особо выделяют следующие типы водоносных пластов.

а. Неограниченный пласт, который характеризуется весьма большими размерами и такой удаленностью границ от осушительной системы, что они практически не оказывают влияния на процесс осушения. Для отнесения пласта к этому

типу нужно сравнить его размеры с расчетным радиусом влияния, вычисленным по формулам § 3 гл.II.

б. Полуограниченный пласт, который характеризуется одной прямолинейной границей; на границе могут быть заданы или постоянный напор (например, область фильтрации, примыкающая к крупной речной долине), или постоянный расход (например, пласты, примыкающие к прямолинейным непроницаемым границам - сбросам), или условия III рода (река с сильно закольматированным руслом)[x].

в. Полосообразный пласт, ограниченный двумя прямолинейными параллельными контурами, имеющими неограниченную протяженность.

г. Пласт-квадрант, ограниченный двумя прямолинейными контурами, пересекающимися под прямым углом.

д. Круговой пласт, который ограничен непрерывным круговым контуром. В гидромеханическом смысле к такой схеме нередко приводятся водоносные горизонты, приуроченные к мульдообразно залегающим пластам. В зависимости от характера питания водоносного горизонта, на границе кругового пласта может быть задан или постоянный напор, или постоянный расход. Последний случай встречается более часто.

Перечисленные формы границ области фильтрации называются типовыми (при условии, что они остаются неизменными во времени), а все прочие - сложными.

2. По строению области фильтрации в разрезе водоносные горизонты дифференцируются:

а) по характеру водопроницаемости - на однородные, слоистые и неоднородные; для однородного водоносного горизонта водопроницаемость одинакова во всех точках; слоистый водоносный горизонт состоит из нескольких однородных слоев и обычно может быть приведен к однород-

---

x) В процессе водопонижения условия на контурах рек с сильно закольматированным руслом могут переходить в условия II рода - если русло реки становится "подвешенным".

ному в целом, в то время как для неоднородного горизонта такое приведение допустимо лишь в некоторых частных случаях (гл.II § 5);

б) по характеру залегания водоупорного ложа, подстилающего водоносную толщу – на горизонтально залегающие и наклонно залегающие. Уклон водоупора иногда необходимо учитывать уже при малых углах падения (порядка 3–5°) – в частности, при расчете "проскока" воды в карьер между скважинами контурного дренажа.

3. По условиям питания и разгрузки водоносных горизонтов на площади их распространения можно выделить следующие факторы:

а) питание водоносного горизонта за счет инфильтрации. Инфильтрацию следует учитывать в расчетных схемах лишь в тех случаях, когда величина ее в условиях карьерного водопонижения отличается от "естественной" [x] (например, инфильтрация из реки с "подвешенным" руслом, инфильтрация под гидроотвалами, инфильтрация атмосферных и технических вод на участках водоносных пластов, вскрытых карьером и т.п.); в противном случае инфильтрация "автоматически" учитывается путем вычитания расчетных понижений от отметок естественной депрессионной поверхности /6/ [xx]; при расчетах притока к участку контура дренажа (или карьера) к расчетной величине притока должен прибавляться (с соответствующим знаком) расход естественного потока, приходившийся на этот участок;

б) питание или разгрузка водоносных горизонтов за счет перетекания вод через относительно "водоупорные" слои из одного водоносного горизонта (с большим напором) в дру-

---

x) Это не относится к тем случаям, когда расчет притоков проводится балансовыми методами.

xx) Такой прием недопустим для случаев фильтрации, описываемых так называемыми нелинейными уравнениями; ниже эти случаи будут отмечаться особо.

гой (с меньшим напором). Степень развития процессов перетекания зависит от величин перепадов напоров, площади перетекания, проницаемости и мощности "водоупорного" слоя; при этом иногда перетекание следует учитывать даже при весьма малых коэффициентах фильтрации "водоупорных" слоев (порядка 10^{-4} - 10^{-5} м/сутки).

4. Внутренние границы области фильтрации определяются расположением и формой карьера, а также расположением, типом и числом осушительных устройств.

а. Карьеры (котлованы) могут быть совершенными и несовершенными.

Во всех случаях, когда по условиям строительства и эксплуатации ожидается поступление подземных вод в карьер, последний следует рассматривать как контур стока водоносного горизонта (в частности, все совершенные и затопленные несовершенные карьеры).

б. По типу осушительных устройств различают дрены горизонтального и вертикального типов, совершенные и несовершенные.

в. По способу расположения в плане дрен вертикального типа можно выделить следующие схемы: одиночная дрена; линейные ряды взаимодействующих дрен; контурные ряды; площадная система дрен.

г. По расположению в плане дрен горизонтального типа можно выделить следующие схемы: одиночная линейная дрена; контурная дрена; система параллельных линейных дрен.

5. Виды граничных условий на внутренних границах водоносного горизонта могут быть различными.

а. Для контура карьера, для сквозных и забивных фильтров, поглощающих и самоизливающих скважин, для большинства горизонтальных дрен наиболее характерны граничные условия 1 рода. Иглофильтровые установки также могут рассматриваться как контур с заданным понижением.

б. Водопонижающие скважины могут работать или с постоянным расходом или с постоянным понижением. Для оценки режима работы водопонижающей скважины, прежде всего, следует определить приток к скважине в условиях установившегося режима (Q_c) при максимально возможном понижении [x] (S_{max}) и оценить водозахватную способность скважины ($Q_{вз}$). Если расход насоса $Q_н > Q_c$, то скважина будет все время работать с постоянным расходом, равным $Q_н$ – при условии $Q_н \leq Q_{вз}$ или равным $Q_{вз}$ – при условии $Q_н > Q_{вз}$. Если же $Q_н > Q_c$, то в течение первого периода откачки скважина будет работать с постоянным расходом, равным $Q_н$, а затем, – с постоянным понижением, равным S_{max}. Протяженность первого этапа можно оценить из условия $S_c = S_{max}$, где S_c – расчетное понижение в скважине, работающей с постоянным расходом, равным $Q_н$.

6. В зависимости от формы области фильтрации, строения ее в разрезе, граничных условий и расположения осушительных устройств, все расчетные гидрогеологические схемы могут быть разделены на типовые и сложные.

а. Типовая расчетная схема предполагает выполнение следующих условий:

1) форма области фильтрации в плане соответствует одному из типов, выделенных в п.1, и остается неизменной во времени;

2) строение водоносной толщи в разрезе-однородное или слоистое, приводимое к однородному;

3) залегание водоупорного ложа – горизонтальное (для случаев безнапорной фильтрации);

4) питание по площади может не приниматься во внимание (за исключением, разве, случаев плоскопараллельного и осесимметричного движений).

---

x) Максимально возможное понижение S_{max} определяется отметкой всасывателя насоса или отметкой подошвы водоносного пласта (если насос заглублен ниже "водоупора").

Гидрогеологический расчет осушения в типовых условиях, в большинстве случаев, может производиться по аналитическим зависимостям.

б. В тех случаях, когда какое-либо из перечисленных в п."а" условий не выполняется, расчетные гидрогеологические схемы следует рассматривать, как сложные. Сюда, в частности, относится большинство случаев расчета дренажных скважин (фильтров) вблизи совершенных и затопленных котлованов, представляющих собой контуры стока (п.4-а). Фильтрационные расчеты для сложных условий обычно требуют привлечения, в той или иной степени, методов моделирования.x)

§ 5. Рекомендуемый порядок фильтрационных расчетов процесса осушения карьерного поля

Гидрогеологические расчеты осушения, в общем случае, рекомендуется проводить в следующем порядке.

1. Выбираются основные исходные данные для расчета и составляется природная гидрогеологическая схема карьерного поля в целом (§ 3).

2. Для каждого из выделенных водоносных горизонтов, по возможности, составляется типовая расчетная схема (§ 4). Если расчетная схема относится к категории сложных, то строится (приближенно) сетка движения, причем предполагается, что подземные воды дренируются только самим карьером; намечаются характерные ленты тока (гл.II § 1).

3. Определяются основные расчетные параметры для каждого водоносного горизонта:

---

x) В некоторых случаях, при задании на границах условий первого или третьего рода, расчет требует привлечения моделирования даже в типовых схемах.

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 или пьезопроводности (см., в частности, §3 п.2);

г) заданные понижения (для несовершенных котлованов) или заданные величины допустимого "проскока" к откосу (для совершенных котлованов) – согласно требованиям, изложенным в разд.II;

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 водоносного горизонта в отдельности. Если те или иные средства осушения работают на несколько горизонтов, это учитывается дополнительными расчетами.

4. Определяется общий приток к карьеру, распределение притоков по участкам и их изменение во времени. Для первых этапов расчет должен вестись по формулам неустановившегося движения. Примерное время, необходимое для достижения установившегося режима в случае областей с фиксированными контурами обеспеченного питания, определяется согласно формулам (II.7)–(II.8). Для безнапорных горизонтов с удаленными границами питания неустановившийся режим может иметь место в течение всего периода эксплуатации карьера.

При оценке общих объемов откачиваемых вод полученные величины притоков должны суммироваться с величиной ожидаемого поступления в карьер атмосферных или талых вод.

5. Оценивается возможность дополнительного (по сравнению с "естественными" условиями) питания горизонтов за счет инфильтрации и перетекания [x]. Для этого

---

x) В частности, за счет инфильтрации на участках вскрытия карьером водоносных пластов.

сначала могут использоваться грубо приближенные приемы.

а. Для оценки величины суммарной дополнительной инфильтрации можно пользоваться формулой $Q_{инф} = \omega F$, где F – площадь инфильтрации, ω – удельная дополнительная (по сравнению с естественной) инфильтрация.

б. Для оценки величины перетекания можно вести расчет по формуле:

$$Q_{пер} = \sum_{F} \kappa_b \frac{\Delta H_i}{m_b} f_i , \qquad (1.6)$$

где индекс "b" относится к разделяющему слою, i – номера участков области фильтрации, в пределах которых величина удельных расходов перетекания может приниматься примерно постоянной, ΔH_i – величина разностей уровней взаимодействующих горизонтов в пределах i -го участка (определяется по пьезометрическим кривым, построенным без учета перетекания), f_i – площадь i – го участка.

в. Если величины $Q_{инф}$ или $Q_{пер}$ соизмеримы с определенными ранее (без учета этих процессов) водопритоками, то необходимо провести более точный расчет с учетом инфильтрации и перетекания.

6. Полученные величины притоков оцениваются с точки зрения их влияния на условия ведения горных работ и устойчивость откосов (разд.1); далее возможны два варианта:

а) если заградительного дренажа не требуется, то расчет заканчивается определением пропускной способности открытых прибортовых канав, а также параметров горизонтального прибортового дренажа (если он применяется); кроме того, проводится расчет уровней в нескольких характерных точках;

б) если проверка покажет необходимость заградительного дренажа, то проводится дальнейший расчет с целью выявления оптимальной схемы такого дренажа; для этого намечается несколько возможных рациональных вариантов -

в соответствии с разд.II, каждый из которых рассчитывается отдельно для нескольких характерных этапов работы карьера.

7. Расчет притоков к открытым траншеям, дренажным штрекам, горизонтальным скважинам, задаваемым из выработанного пространства, а также иглофильтрам проводится непосредственно по формулам гл.VI. Для систем водопонижающих скважин, оборудованных насосами, а также вертикальных (и наклонных) безнасосных скважин, сквозных фильтров и т.п., сначала проводится приближенный расчет, а затем - уточняющий.

8 а. Приближенный расчет скважин, оборудованных насосами.

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

$$n_y = \frac{Q_y}{Q_н}, \qquad (1.7)$$

где $Q_н$ - производительность насоса,

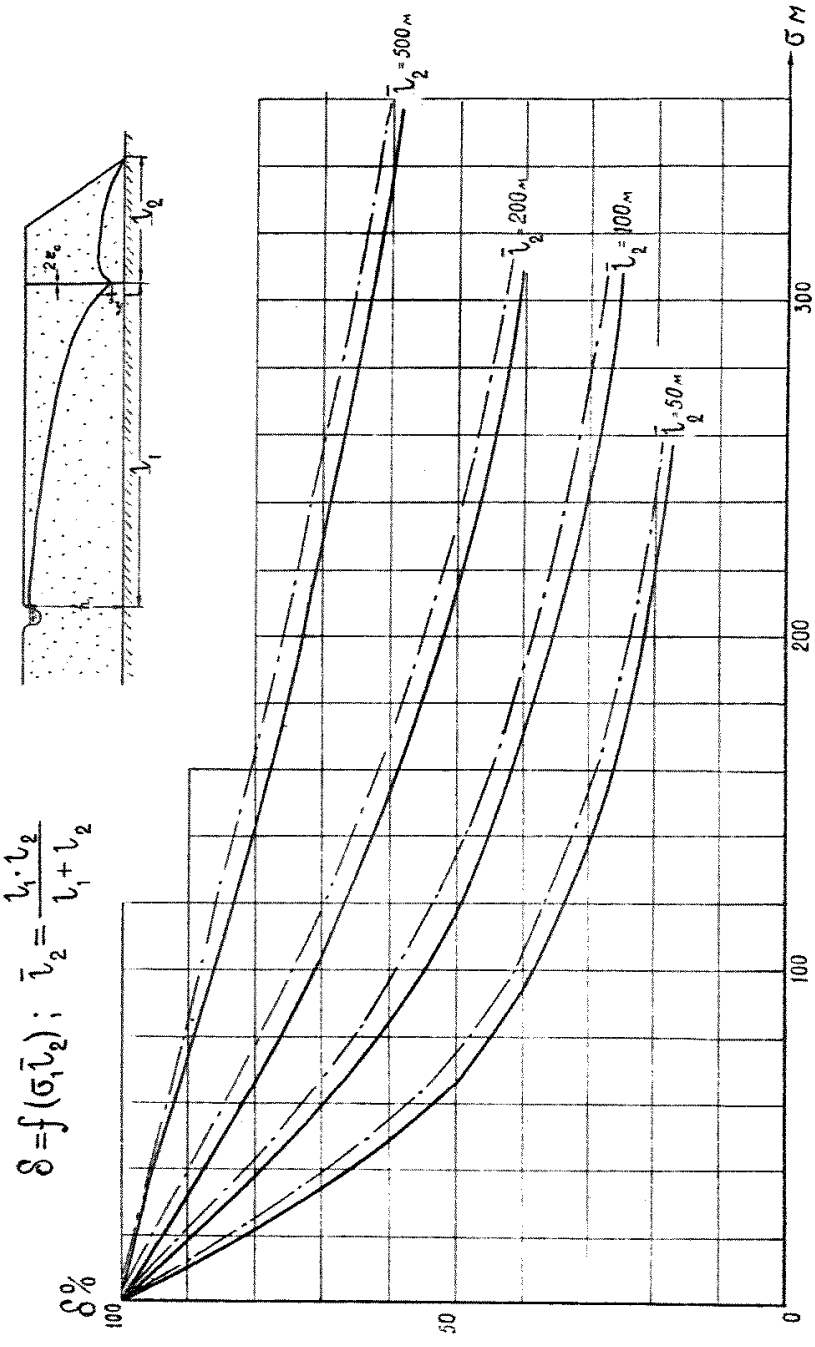
Q_y - общая величина притока к участку (см.п.4).

При этом следует помнить о необходимости выполнения условия $n_c \geqslant 0$, что проверяется с помощью формул (III.1 и III.2) при $n_{ф.} = T$.

В случае совершенных котлованов может быть рекомендован график (рис.1) зависимости $\delta = f(\delta_1, \bar{l}_2)$, где δ - коэффициент заслона, определяемый формулой:

$$\delta = 1 - \frac{q_0}{q}, \qquad (1.8)$$

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. разделы I и II) или к внутреннему дренажному контуру - если он существует (исходя из его оптимальной производи-



Примечание: График построен для случая плоского однородного пласта; в прочих случаях следует предварительно осуществлять приведение согласно § 2 гл. II.
График построен для случая $h_c^2 \ll h_1^2$,

——— для $r_c = 0{,}1$ м
— · — для $r_c = 0{,}2$ м

Рис.1. График для определения расстояния между скважинами.

тельности). Затем, задаваясь величиной

$$\delta^0 = 1 - \frac{q_0^0}{q}, \qquad (1.8а)$$

по графику можно определить требуемую величину δ, которая должна удовлетворять условию: $\delta(\sigma, \bar{\tau}_2) \geqslant \delta^0$.

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

В случае несовершенных котлованов следует исходить из условия:

$$h_ф = T, \qquad (1.9)$$

где величина $h_ф$ определяется по (Ш.1) или (Ш.2) при $Q_c = \frac{Q_y}{n}$.

Для совершенных котлованов расчет аналогичен случаю скважин, оборудованных насосами.

в. На основании прикидочных расчетов подбирается расстановка скважин и мощность насосного оборудования, после чего проводится уточняющий расчет согласно гл.У.

ГЛАВА II.

МЕТОДЫ СХЕМАТИЗАЦИИ УСЛОВИЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В настоящей главе рассматриваются методы схематизации условий фильтрации, позволяющие путем некоторых оправданных допущений существенно упростить расчетную схему.

§ 1. Выделение расчетных лент тока

1. Большинство расчетов, проводимых для сложных условий (а в ряде случаев – и для типовых), целесообразно осуществлять после предварительного деления области фильтрации на ряд фрагментов, каждый из которых может рассчитываться обособленно. Такими фрагментами являются ленты тока, границами которых служат две фиксированные линии тока, природные границы пласта и внутренние границы области фильтрации – контур карьера или дренажный контур.

2. Для расчета неустановившегося движения целесообразно использовать принцип недеформируемости линий тока /3/, согласно которому боковые границы лент остаются во времени неизменными, т.е. такими же, как и в условиях установившейся фильтрации (при одних и тех же граничных условиях). Такое предположение дает вполне надежные результаты для условий квазистационарного режима, т.е. для большинства случаев, представляющих практический интерес при расчетах осушения карьеров (гл.1 § 1). В дальнейшем будет показано (гл.1У § 1), что в некоторых условиях целесообразно проводить построение лент тока для нескольких этапов водопонижения.

3. Построение линий тока, представляющих собой боковые границы лент, может проводиться на моделях (разд. 1У) или графически. Графическое построение каждой расчетной ленты тока целесообразно производить в следующем порядке: а) вблизи расчетного участка, в первом приближении, намечаются эквипотенциальные линии; б) нормально к ним проводятся две линии тока, образующие ленту тока; в) для каждой ячейки определяется расход Q_r, который обычно, в первом приближении, оказывается разным для различных ячеек; г) с учетом характера изменения величин Q_r вновь производится построение эквипотенциальных линий и, соответственно, линий тока до тех пор, пока не будет достигнуто постоянство величин Q_r для всех ячеек ленты тока с точностью порядка 5%.

4. Критерием для выбора характерных лент тока является их длина (т.е. расстояние от выработки до контура питания) и очертания. Обычно характерная лента тока выбирается таким образом, чтобы результаты гидрогеологического расчета по ленте можно было распространить на некоторый прилежащий сектор гидродинамической сетки.

§ 2. Приведение планового потока к плоскому одномерному

1. При сложных очертаниях области фильтрации целесообразно прибегать к схематизации планового установившегося

движения плоско-параллельным движением, т.е. движением, при котором все линии тока взаимно параллельны. Для этого следует разбить область фильтрации на отдельные характерные ленты тока (§ 1) и привести их к эквивалентным плоским /10/:

$$x_р = n_д(x_д)\frac{B_k}{\left(\frac{B}{l}\right)_{ср}}, \qquad (П.1)$$

где $\left(\frac{B}{l}\right)_{ср}$ - среднее отношение ширины отсека ленты к его длине (рис.2), которое для однородных сред является постоянным вдоль всей ленты, $n_д(x_д)$ - число отсеков ленты в интервале $[0, x_д]$, которое может выражаться и дробным числом; $x_д$ и $x_р$ - действительное и расчетное расстояния от рассматриваемой точки потока до внутренней границы ленты. Для облегчения расчетов целесообразно строить график зависимости $x_р = f(x_д)$.

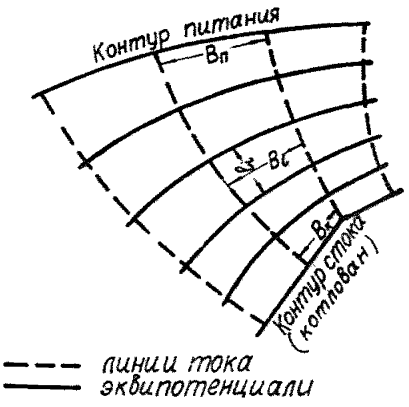


Рис.2. Схема ленты тока.

2. Если проводимость потока в пределах ленты меняется, то это обстоятельство должно учитываться при приведении ленты к плоской, для чего величина $\left(\frac{B}{l}\right)_{ср}$ определяется по формуле:

$$\left(\frac{B}{l}\right)_{ср} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{k_i m_i}{k m}\frac{B_i}{l_i}, \qquad (П.2)$$

где $k m$ - выбранная расчетная проводимость (одинаковая для всей ленты тока).

Для безнапорных потоков

$$\left(\frac{B}{l}\right)_{ср} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{k_i B_i}{k l_i} \qquad (П.2а)$$

3. В дальнейшем расчет ведется по основной формуле плоско-параллельного потока:

$$q = k\,\frac{h^2(x_1) - h^2(x_2)}{2\,(x_1 - x_2)}\,, \qquad (П.3)$$

при подстановке в нее вместо действительных расстояний ($x_д$) приведенных ($x_р$), снимаемых с графика $x_р = f(x_д)$.

§ 3. Принцип "большого колодца" и величина условного радиуса влияния

А. О принципе "большого колодца"

1. При расчете притоков к карьерам, а также к дренажным системам может широко применяться принцип "большого колодца":

$$Q = \frac{\pi k\,(h_1^2 - h_2^2)}{\ln\, R/r_к}\,, \qquad (П.4)$$

где $r_к$ - определяется согласно § 4, а R - согласно § 3 п.Б.

2. Этим принципом можно пользоваться при выполнении условия /7/: $\delta_к / R_* > 0,1$, где $\delta_к$ - минимальное расстояние от центра дрены до контура питания. Для дрен больших размеров (котлованы, траншеи), должно, кроме того, выполняться соотношение $\delta_к / d \geq 0,5$, где d - максимальный размер выработки (в плане). Наконец, для условий неустановившейся фильтрации имеются дополнительные критерии применимости приведения к "большому колодцу" (гл.У § 3).

3. Приведение к "большому колодцу" является удобным

и эффективным приемом, позволяющим легко определить величину общего водопритока в типовых условиях. Вместе с тем, расчет по формуле "большого колодца" обычно не исключает необходимости определения притоков по отдельным участкам карьерного поля, так как, в общем случае, распределение притоков по периметру карьера весьма неравномерное.

4. Для расчета уровней формула "большого колодца" может использоваться только при осесимметричном движении.

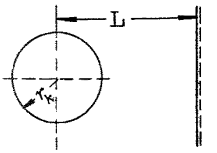
Б. Условный радиус влияния.

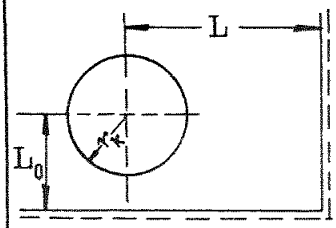
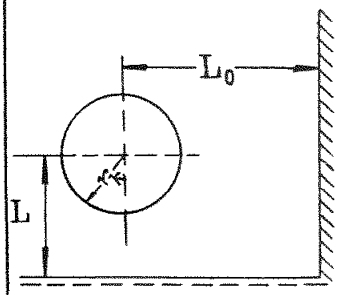
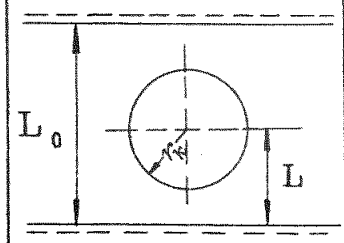
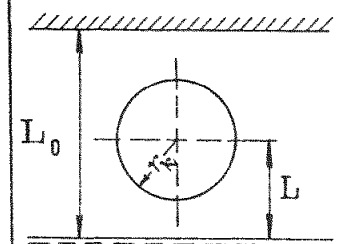
В формулу "большого колодца" входит величина условного радиуса влияния. Этот параметр является расчетной величиной, подстановка которой в формулу "большого колодца" позволяет получить "точное" значение водопритока.

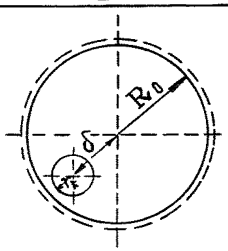
1. Определение условного радиуса влияния при установившейся фильтрации.

а. В пластах с фиксированными границами для условного радиуса влияния R при установившейся фильтрации получены аналитические выражения для некоторых простейших (типовых) граничных условий (табл.1) /10/.

Таблица 1

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Выражение для R
1	2	3
1. Котлован у реки (у линейной границы с постоянным напором)		R = 2L

1	2	3
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 непроницаемой границей.		$R=\frac{4}{\pi}L_0\,\mathrm{tg}\frac{\pi L}{2L_0}$

1	2	3
6. Котлован в круговой области с постоянным напором на границе.		$R = R_0 - \frac{\delta^2}{R_0}$

б. В неограниченных пластах

В условиях неограниченных пластов следует избегать использования величины "установившегося радиуса влияния", а проводить расчет по формулам неустановившегося движения. В частности, не рекомендуется применять известные формулы Кусакина и Зихардта. Лишь для водоносных горизонтов, получающих питание за счет перетекания, когда и в условиях неограниченного пласта может сравнительно быстро наступить установившийся режим, целесообразно использовать зависимость /11/:

$$R = 1{,}123\sqrt{\frac{k\,m\,m_в}{k_в}}\,, \qquad (11.5)$$

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

При $\xi = r_0 \sqrt{\frac{k_в}{k m m_в}} > 0{,}2$ вместо формулы (II.5) следует пользоваться формулой:

$$R = \exp\left[\frac{K_0(\xi)}{\xi K_1(\xi)}\right] \cdot r_0 , \qquad (II.5а)$$

$$\exp(x) = e^x,$$

где K_0 и K_1 – функции Бесселя II рода, соответственно, нулевого и первого порядков. Для удобства расчетов рекомендуется график, представленный на рис.3.

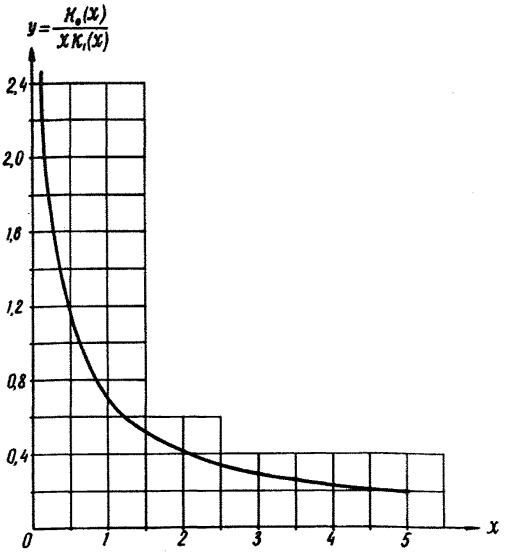


Рис. 3.

Для безнапорного горизонта в формулы (II.5) и (II.5а) вместо " m " подставляется величина h_0^0 (первоначальная мощность безнапорного потока). Формулы (II.5) и (II.5а) применимы лишь в том случае, когда уровень питающего горизонта может считаться независящим от перетекания, что допустимо, если его проводимость превышает проводимость рассматриваемого горизонта, как минимум, в в 20–40 раз.

2. Определение условного радиуса влияния при неустановившемся режиме фильтрации.

а. Величина условного радиуса влияния при неустановившемся режиме / $R(t)$ / может использоваться для определения величин водопритоков при заданном понижении на контуре дренажа, при условии $R(t) < R_*$, где R_* - расстояние до ближайшей границы пласта. x)

б. При осесимметричном движении в безнапорных горизонтах, при постоянном уровне на контуре дренажа /28/:

$$R(t) = r_к + \sqrt{\pi a t} \quad . \qquad (II.6)$$

Если понижение на контуре дренажа меняется по закону $S = b \cdot t^{\alpha}$, где b и α - постоянные величины, то /13/:

$$R(t) = r_к + \sqrt{\frac{\pi + 4\alpha}{(1+2\alpha)^2}\, at} \quad . \qquad (II.6а)$$

в. В условиях плоского одномерного потока можно пользоваться формулами (II.6) и (II.6а) при $r_к = 0$ /24/.

г. Для напорных горизонтов в формулы (II.6) и (II.6а) вместо a подставляется a^*.

д. 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).

При постоянном напоре на контуре дренажа:

$$t_y \approx \frac{(R_* - r_к)^2}{\pi a} \qquad (II.7)$$

---

x) Приводимые формулы неприменимы для расчета неустановившейся фильтрации при наличии перетекания.

При постоянном дебите дренажной установки /31/:

$$t_y \approx (0{,}5 \div 0{,}8)\,\frac{R_*^2}{a} \qquad (II.8)$$

В формулах (II.7) и (II.8) за R_* принимают 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 $t \geqslant t_y$ - по формулам установившегося режима для конечного пласта с фиксированным напором на контуре питания.

§ 4. Определение приведенного радиуса карьера и дренажной системы

Для расчета общих водопритоков к горным выработкам и дренажным системам сложных форм в плане, согласно принципу большого колодца (§ 3), целесообразно условно приводить выработки к круглой в плане форме, а дренажные системы - к кольцевому ряду. Радиус $r_к$ такой окружности называют приведенным радиусом.

1. Для котлованов или контуров примерно прямоугольной формы /10/:

$$r_к = \eta\,\frac{a+b}{4}, \qquad (II.9)$$

причем значение η в зависимости от отношения $\frac{b}{a}$ находится в табл.2.

Таблица 2

b/a	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
η	1,05	1,08	1 ,12	1,144	1,16	1,174

2. Для выработок или контуров сложной формы /10/:

$$\lg r_k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \lg r_i \ , \qquad (II.10)$$

где r_i - расстояния от расчетной точки (например, центр выработки) до характерных точек на периметре выработки или дренажного контура (например, угловые и срединные точки); n - число характерных точек на периметре выработки или контура.

3. Для линейного ряда дренажных устройств /4/:

$$\lg r_k = f_0(n) - \frac{6}{B} \lg \frac{6}{r_c} + \lg 6 \ , \qquad (II.11)$$

где $f_0(n)$ - определяется по рис.4, B - длина ряда, n - число скважин.

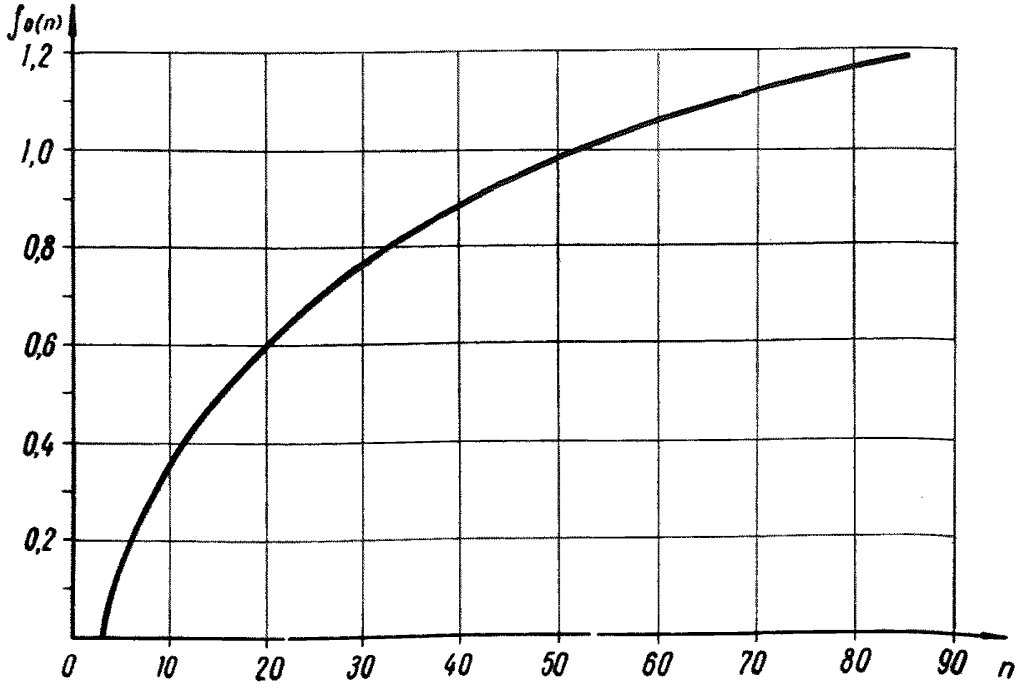


Рис.4.

4. При равномерной сетке дренажных устройств /4/:

$$r_k = \varphi \sqrt[n]{r_c \left(\frac{\sqrt{F}}{\sqrt{n}-1}\right)^{n-1}} \ , \qquad (II.12)$$

где F – площадь расположения дренажных устройств;

φ – параметр, определяемый по табл.3.

Таблица 3

n	5	7	9	15	25	100	200	225
φ	0,8	1,0	1,1	1,4	1,8	3,6	4,9	5,2

§ 5. Приведение неоднородных в фильтрационном отношении толщ к однородным

А. Приведение слоистых толщ к однородным

1. При соотношении проводимостей слоев менее 10:1.

а. При напорном движении приведение слоистой толщи к однородной осуществляется путем осреднения коэффициентов фильтрации отдельных пластов /19/:

$$k_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i m_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \qquad (II.13)$$

где n – число слоев.

Средний коэффициент пьезопроводности определяется формулой /6/:

$$a^*_{ср} = \sum_{i=1}^{n} k_i m_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} \frac{k_i m_i}{a^*_i} \qquad (II.14)$$

б. Для безнапорного движения вводится функция Н.К. Гиринского /19/:

$$\varphi_r = \left(\frac{k h^2}{2}\right)_{расч.} = \sum_{i=1}^{n} k_i m_i \left[h - Z_i\right], \qquad (II.15)$$

где h – мощность безнапорного потока в рассматриваемой точке,

Z_i – расстояние от середины каждого слоя до горизонтального водоупора (рис.5).

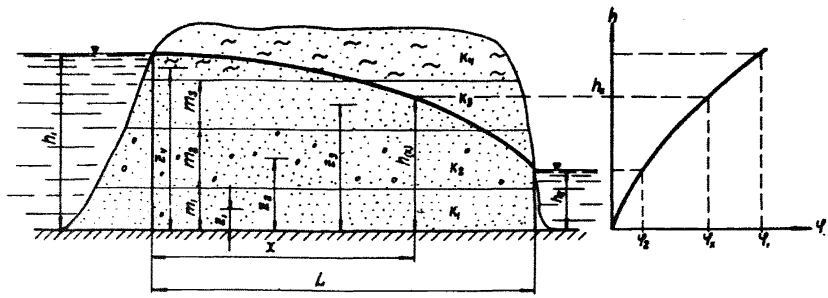


Рис.5. Схема к расчету безнапорной фильтрации в условиях многослойной толщи.

Расчет проводится в такой последовательности:

1) строится график зависимости $\varphi_r = f(h)$, для чего в формуле (II.15) задаются произвольными значениями h в пределах от мощности потока на контуре дренажа h_2 до мощности потока на контуре питания h_1;

2) определяются искомые величины расходов, для чего используются те же формулы, что и для безнапорной фильтрации в однородной среде, но с заменой величины $\frac{k h^2}{2}$ на функцию Гиринского φ_r, в соответствии с (II.15);

3) по соответствующим формулам безнапорной фильтрации в однородной среде, после замены $\frac{k h^2}{2}$ на φ_r, определяются значения функции Гиринского в тех точках, где требуется найти величины h;

4) по полученным величинам φ_r с графика $\varphi_r = f(h)$

снимают соответствующие значения h .

Средний коэффициент уровнепроводности определяется по формуле

$$a_{ср} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} k_i m_i\right)_{ср}}{\mu_{ср}}, \qquad (II.16)$$

где $\left(\sum_{i=1}^{n} k_i m_i\right)_{ср}$ определяется аналогично величине $h_{ср}$ (гл.1,§ 3), а для определения $\mu_{ср}$ рекомендуется формула

$$\mu_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sqrt{(k_1 m_1 + k_2 m_2 + \ldots + k_i m_i)\mu_i}}{\sum_{i=1}^{n} \sqrt{\frac{k_1 m_1 + k_2 m_2 + \ldots + k_i m_i}{\mu_i}}} \qquad (II.16\text{-а})$$

Если депрессионная кривая располагается, преимущественно, в пределах верхнего слоя, то средняя водоотдача принимается равной водоотдаче этого слоя.

2. При соотношении проводимостей слоев более 10:1.

а. Если более проницаемый слой перекрывается менее проницаемым, в пределах которого, в основном, располагается депрессионная поверхность, то можно считать, что расчетная проводимость равна проводимости нижнего слоя, а расчетная водоотдача равна водоотдаче верхнего слоя. Такое предположение оказывается вполне допустимым при условии /30/:

$$\frac{k_{верх} \cdot t}{\mu_{верх} \cdot m_{верх}} > 2{,}5 \div 5$$

б. Если менее проницаемый слой перекрывается более проницаемым и подстилается "водоупором", то допустимо осреднение, аналогичное п.1.

в. Во всех прочих случаях (кроме отмеченных в пп. "а" и "б") слабопроницаемый слой рассматривается как относи-

тельный водоупор и расчет ведется раздельно для каждого водоносного горизонта, при необходимости – с учетом перетекания.

3. Все упомянутые выше приемы по осреднению параметров потока дают заметную погрешность при определении уровней в зоне, прилежащей к дренажной выработке, а для расчета фильтрации к несовершенным выработкам они нередко вообще неприменимы (за исключением тех случаев, для которых найдены формулы, приводящие несовершенную выработку в слоистой среде к совершенной – гл.Ш § 2 п.В). Поэтому в подобных расчетах следует привлекать моделирование.

Б. Приведение фильтрационных толщ, неоднородных в плане, к однородным

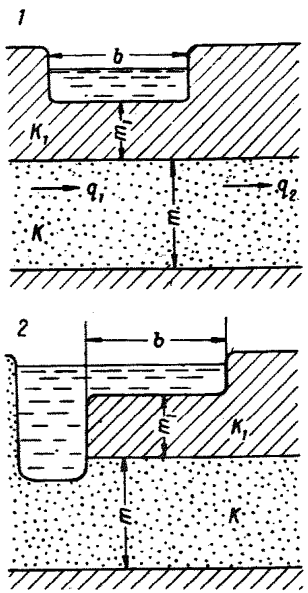
1. В условиях установившейся фильтрации такое приведение требует предварительного построения лент тока, после чего расчет ведется согласно формулам (II.2) или (II.2а). При соотношении проводимостей отдельных зон, превышающем 20÷40, зона с большей проводимостью может приниматься за область питания (при расчете фильтрации во второй зоне).

2. В условиях неустановившейся фильтрации приведение неоднородной в плане толщи к однородной, в общем случае, не представляется возможным, так что необходимые расчеты следует проводить на моделях.

В. Учет сопротивления ложа водоемов

Учет влияния сопротивления ложа водоема производится путем фиктивного удлинения потока подземных вод (вдоль предварительно выделенных лент тока – § 1) на величину ΔL, которая будет эквивалентна в фильтрационном отношении ложу водоема. Расчетные формулы для простейших схем строения ложа водоема приведены в табл.4.

Таблица 4.

Расчетная схема	Выражение для ΔL
	а. $\Delta L=\sqrt{\frac{kmm_1}{k_1}}\,cth\left(\frac{b}{2}\sqrt{\frac{k_1}{kmm_1}}\right)$ – при симметричном движении потока ($q_1=q_2$); б. $\Delta L=\sqrt{\frac{kmm_1}{k_1}}\,cth\left(b\sqrt{\frac{k_1}{kmm_1}}\right)$ – при одностороннем движении ($q_1=0$ или $q_2=0$); при $b\sqrt{\frac{k_1}{kmm_1}}>3$ $\Delta L=\sqrt{\frac{kmm_1}{k_1}}$.
	$\Delta L=\sqrt{\frac{kmm_1}{k_1}}\,th\left(b\sqrt{\frac{k_1}{kmm_1}}\right)$

Г. О приведении толщ трещиноватых пород к однородым фильтрующим средам

1. В настоящее время считается общепризнанным, что расчет фильтрации в трещиноватых породах в большинстве случаев можно проводить по тем же формулам, что и для пористых пород /15/. Исключения из этого правила относятся к тем случаям, когда водопритоки связаны, главным образом, с тектоническими трещинами (зонами), удаленными друг от друга на значительные расстояния – порядка десятков и сотен метров. В подобных условиях, требующих построения новых схем движения подземных вод, обычные схемы фильтрационных расчетов могут быть использованы лишь с большими оговорками или же вообще неприменимы, что связано, во-первых, с резко выраженной неоднородностью среды и неясностью самого понятия величины попереч-

ного сечения фильтрационного потока, а во-вторых - с возможностью перехода ламинарного движения в турбулентное. Поэтому результаты предварительных расчетов, выполненных на основе данных детальной разведки, в таких условиях следует рассматривать как сугубо ориентировочные; соответствующие уточнения проводятся по данным наблюдений в период строительства и эксплуатации карьера.

2. Расчет фильтрации в трещиноватых породах может проводиться двояко, в зависимости от распространения трещиноватых зон. Если эти зоны приурочены к определенному пласту пород, то расчет проводится в соответствии с условиями залегания данного пласта (или как для наклонного, или как для горизонтального пласта). Если трещиноватость приурочена к определенной поверхностной зоне (например, трещины коры выветривания) и распределение ее не зависит от залегания слоев, то расчет, как правило, должен проводиться аналогично горизонтально залегающим водоносным пластам.

§ 6. Приведение напорно-безнапорной фильтрации к напорному или безнапорному движению

1. Для расчета напорно-безнапорного установившегося движения подземных вод целесообразно сводить его к условному безнапорному движению путем введения расчетной глубины потока /10/:

$$h_p = \sqrt{2mH - m^2}. \qquad (II.17)$$

2. Для расчета расходов в условиях неустановившейся напорно-безнапорной фильтрации могут быть рекомендованы следующие приближенные приемы:

а) при выполнении соотношения /16/:

$$0{,}3 < \frac{1}{H_0 - m}\sqrt{\frac{a^* m \mu}{k}} = A < 3 \qquad (II.18)$$

расчет можно вести по зависимости (II.17), при определении радиуса влияния по формулам для напорного движения (§ 3 п.Б);

б) при $A < 0{,}3$ расчет можно производить по обычным формулам для напорного движения;

в) при $A > 3$ – расчет можно вести по обычным формулам для безнапорного движения (без учета напоров).

Указанные приемы могут дать ошибку до 10–20%. Для более точного расчета притоков, а также для определения уровней необходимо привлекать моделирование.

§ 7. Учет уклона и волнистости водоупора в условиях безнапорной фильтрации

1. В условиях установившейся фильтрации расчет ведется по выделенным лентам тока (§ 1). Для построения лент тока напоры на границах отсчитываются от произвольной горизонтальной плоскости сравнения. Затем ленты приводятся к плоским (§ 2). Расчет водопритоков в пределах отдельной ленты тока может проводиться по формулам, выведенным для случая горизонтального водоупора, при замене выражения $h_м^2 - h_к^2$ на $(h_м + h_к)\Delta H_{мк}$, где $h_м$ и $h_к$ – глубины потока в сечениях, проходящих через точки М и К, а $\Delta H_{мк}$ – 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, представленными на рис.6 /14/.

В целях уточнения результата можно провести расчет во втором приближении. Для этого определяются мощности (глубины) потока в ряде характерных точек ленты (найденных по первому приближению), после чего приведение ленты к плоской осуществляется повторно, как для потока перемен-

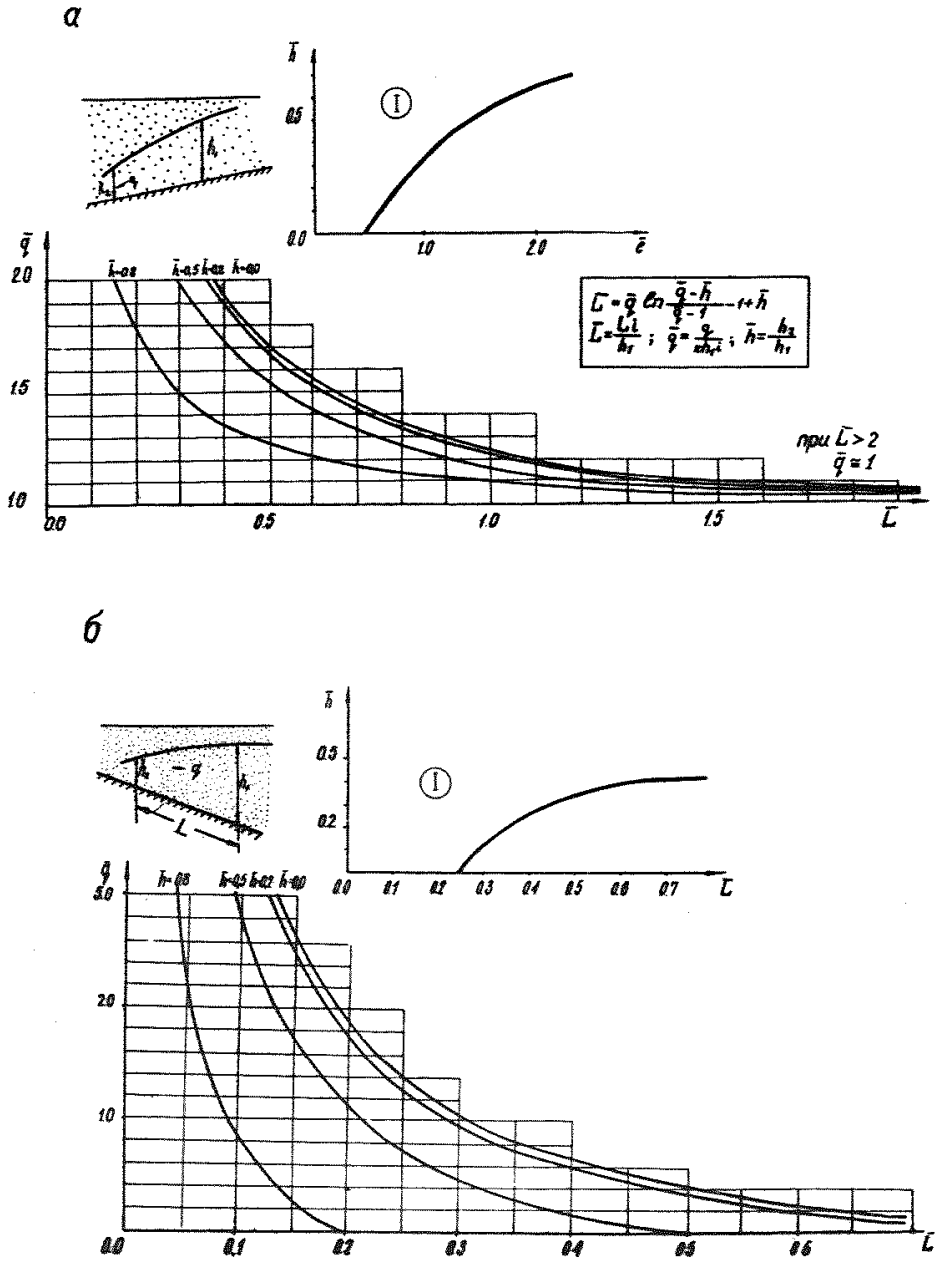


Рис.6. Графики зависимости приведенного расхода ($\bar{q}$) от приведенного расстояния до области питания ($\bar{L}$).

а – Случай прямого уклона водоупора.
в – Случай обратного уклона водоупора.

ной мощности (по формуле II.2).

2. Расчет неустановившейся безнапорной фильтрации при наклонном водоупоре (после выделения лент тока аналогично п.1) может приближенно проводиться по формулам, выведенным для горизонтального водоупора, при замене в них величин h на $(h + 0{,}5ix)$, где h – глубина потока в точке с координатой x; кроме того, величина $h_{ср}$ в выражении коэффициента уровнепроводности a заменяется величиной $(h + 0{,}5ix)_{ср}$. Указанный прием может давать ошибку до 20%. При необходимости получения более точного результата следует ориентироваться на моделирование.

3. При волнистом водоупоре в расчет должны вводиться напоры, отсчитанные от плоскости сравнения, проведенной с таким расчетом, чтобы объем участков водоупорного слоя, расположенных выше этой плоскости, был равен объему участков водоупорного слоя, расположенных ниже ее /3/.

4. Для оценки концентрации потока на участках высачивания, приуроченных к пересекаемым горной выработкой местным ложбинам стока, рекомендуется вводить "коэффициент концентрации", вычисляемый по формуле

$$\alpha_c \approx 1 + \beta \cdot \frac{k h_п}{q_0} \cdot \frac{f}{b}, \qquad (II.19)$$

где b – ширина, f – глубина понижения, q_0 – расход, подсчитанный для плоской поверхности "водоупора", $h_п$ – глубина потока у "входа" в понижение, подсчитанная, как для горизонтального водоупора,

$\beta \approx 0{,}44$ – в среднем по понижению, $\beta \approx 2{,}4$ – для величины коэффициента концентрации вдоль осевой линии понижения.

ГЛАВА Ш

СПОСОБЫ УЧЕТА И СХЕМАТИЗАЦИИ УСЛОВИЙ НА ВНУТРЕННИХ ГРАНИЦАХ ОБЛАСТИ ФИЛЬТРАЦИИ (НА КОНТУРАХ КАРЬЕРОВ И ДРЕНАЖНЫХ УСТРОЙСТВ)

§ 1. Замена рядов скважин фиктивными траншеями (метод фильтрационных сопротивлений)

1. При расчетах фильтрации к линейным и контурным системам водопонижающих скважин, сквозных и забивных фильтров и т.п. часто оказывается удобным, согласно методу эквивалентных фильтрационных сопротивлений /30/, заменить ряд скважин фиктивной совершенной траншеей. Для этого на контуре скважин вводится фиктивный напор (глубина) по следующим формулам /30/:

$$h_ф = \sqrt{h_c^2 + \frac{Q_c}{\pi k} \ln \frac{\delta}{\pi d_c}} \quad - \qquad (Ш.1)$$

для безнапорного движения;

$$H_ф = H_c + \frac{Q_c}{2\pi k m} \cdot \ln \frac{\delta}{\pi d_c} \quad - \qquad (Ш.2)$$

для напорного движения

Выражение $\frac{1}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\pi d_c} = Ф_к$, называемое внутренним фильтрационным сопротивлением ряда скважин, может быть определено по номограмме, представленной на рис.7. Величины $h_ф$ ($H_ф$) примерно соответствуют средним

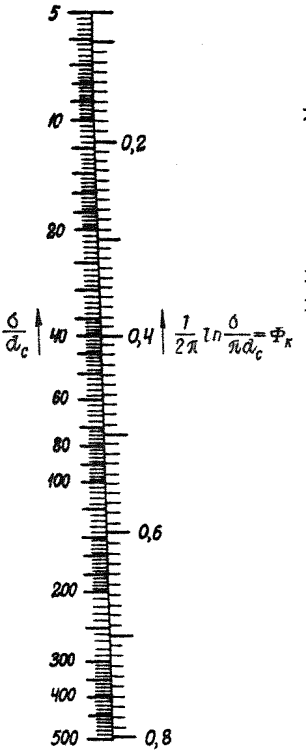


Рис.7. Номограмма для определения внутреннего сопротивления контура.

глубинам (напорам) на линии скважин.

При близком расположении скважин ($\delta < m$) к величине Φ_K следует добавлять дополнительное сопротивление, вычисляемое по формуле /10/:

$$\Phi_{HK}=\frac{1}{2\pi}\ln\gamma, \qquad (III.3)$$

где γ - величина, определяемая по графику, представленному на рис.10 (см.§ 2).

2. Дальнейший расчет ведется по формулам, выведенным для сплошных совершенных дрен (траншей). Исключением являются точки, удаленные от ряда скважин на расстояние, меньшее δ ; здесь уровни (напоры) определяются по особой переходной формуле /3/:

$$h=\sqrt{h_p^2-\frac{2Q_c}{k}\Delta f}, \qquad (III.4)$$

где h_p - расчетная глубина, обусловленная действием фиктивной траншеи, $\Delta f=\Phi_K$ - внутри скважины и

$$\Delta f=-\frac{1}{2\pi}\ln\left(2\sin\frac{\pi y}{\delta}\right)-$$

на линии скважин (y - расстояние от расчетной точки до ближайшей скважины); в частности, Δf =-0,11 для средней точки между скважинами.

Пример расчета приведен в приложении № 3.

3. Описанный прием применим в условиях как установившейся, так и неустановившейся фильтрации. Если расстояние между скважинами не превышает 100 м, то этим приемом можно пользоваться уже при числе скважин, большем двух /9/.

§ 2. Приведение несовершенных выработок к совершенным. Учет несовершенства дренажного контура

А. Скважины в однородных пластах

1. В напорном потоке учет гидродинамического несовершенства скважин-одиночных или расположенных друг от друга на расстоянии, превышающем мощность водоносного пласта - производится путем введения расчетного радиуса скважины /10/:

$$r_{cc} = \alpha r_c \qquad \text{(III.5)}$$

где $\alpha = \exp\left[-\frac{1-\bar{l}}{\bar{l}}\left(\ln\frac{l}{r_c} - \varepsilon\right)\right]$,

$\bar{l} = \frac{l}{m}$ (обозначения ясны из рис.8)[x]

ε - определяется по графику (рис.8) при $\bar{c} = \frac{c}{m-l}$

$\exp(-x) = e^{-x}$ обозначение экспоненциальной функции.

При пользовании графиком следует иметь в виду, что $\varepsilon(\bar{l}) = \varepsilon(1-\bar{l})$. Для фильтра, примыкающего к кровле или подошве пласта, α находится по графику (рис.9).

2. Для скважин, действующих в условиях безнапорного потока, учет гидродинамического несовершенства осуществляется, в принципе, аналогичным образом /10/, при замене мощности потока m расчетной мощностью $h_м$ для безнапорного потока:

а) в общем случае величина $h_м$ определяется формулой /30/:

---

x) В случае затопленного фильтра „l" всегда измеряется длиной его рабочей части.

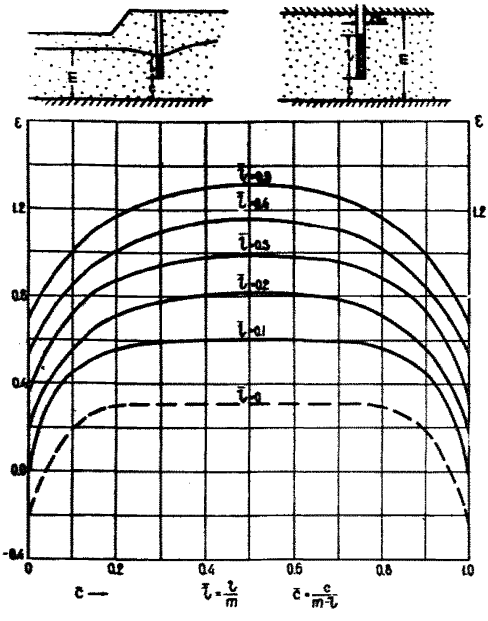


Рис.8. График к определению приведенного радиуса скважины.

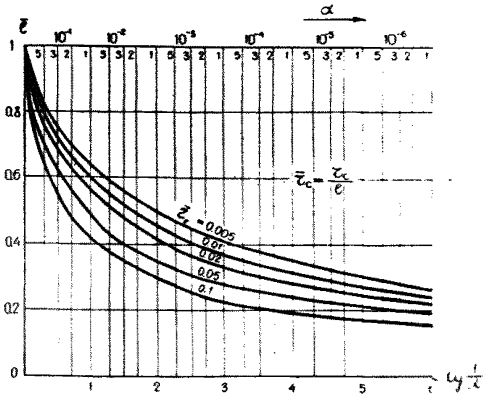


Рис.9. График для определения приведенного радиуса несовершенной скважины.

$$h_м = \sqrt{h_c^2 + \frac{Q_c^0}{\pi K} \cdot \ln \frac{h_c}{r_c}},$$

где Q_c^0 – дебит, который имела бы та же скважина, будучи совершенной, h_c – глубина воды в скважине, отсчитанная от "водоупора";

б) при расчете систем взаимодействующих скважин, работающих вблизи несовершенного котлована, значение $h_м$ целесообразно принимать равным требуемой глубине потока подземных вод под дном несовершенного котлована;

в) в случае совершенного котлована в качестве $h_м$ принимается глубина потока $h_ф$ между скважинами дренажного ряда, определяемая по формуле (III.1). Величина l принимается равной длине рабочей части фильтра – для скважин с незатопленным фильтром, или величине $(h_м - c)$ – для скважин с затопленным фильтром.

3. Если скважины расположены друг от друга на расстоянии, меньшем мощности водоносного пласта, то возникает дополнительное сопротивление за счет взаимодейст-

вия скважин /10/. В этом случае r_{cc} определяется с учетом "коэффициента несовершенства дренажного контура" по формуле:

$$r_{cc} = \alpha \gamma r_c , \qquad (III.7)$$

где $$\gamma = \exp\left[\frac{1 - 0{,}96\sqrt[3]{\bar{\sigma}}}{\bar{\sigma}} \cdot \ln \sin \frac{\pi \bar{l}}{2}\right] \qquad (III.8)$$

Здесь $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{m}$; величина γ определяется по графику, представленному на рис.10.

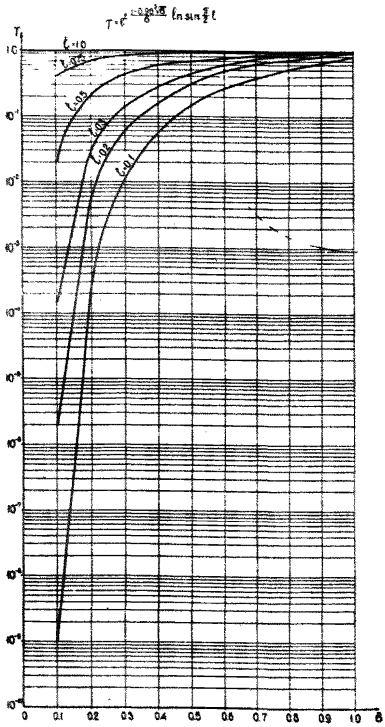


Рис. 10. График для определения коэффициента несовершенства дренажного контура .

Для совершенных скважин, при близком их расположении,

$$r_{cc} = \gamma r_c \qquad (III.9)$$

Б. Котлованы и траншеи в однородных пластах.

1. Несовершенные выработки (траншеи, котлованы) больших размеров в плане ($2b > m$ или $2b > h_0$, где b - ширина выработки), можно рассчитывать как совершенные, если выполнено условие /7/:

$$\frac{m}{R_*} \leqslant 0{,}1 \quad \text{или} \quad \frac{h_0}{R_*} \leqslant 0{,}1 , \qquad (III.10)$$

где R_* - минимальное расстояние до границы области фильтрации.

2. Для траншей со сравнительно малыми поперечными сечениями ($b < (0{,}5\text{-}0{,}25)m$ или $b < (0{,}5\text{-}0{,}25)h_0$) целесообразно вводить на контуре траншеи фиктивный напор /30/:

для безнапорных вод (рис.11а):

$$h_{2\phi} = \sqrt{h_2^2 + 1{,}46 \frac{q}{k} \cdot h_2 \lg \frac{h_2}{\pi r_{0\phi}}}\ , \qquad (III.11)$$

для напорных вод (рис.11б):

$$H_{2\phi} = H_2 + 0{,}73 \frac{q}{k} \cdot \lg \frac{m}{\pi r_{0\phi}}\ , \qquad (III.12)$$

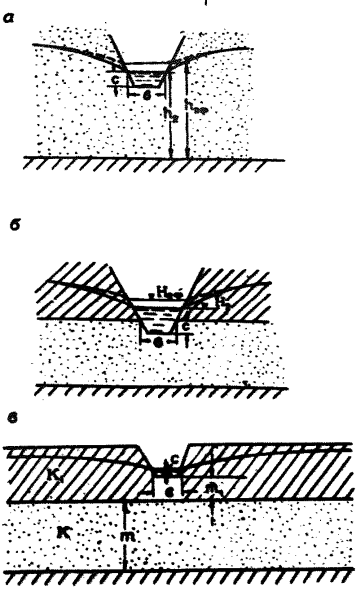


Рис.11. Схемы к расчету несовершенной траншеи.

где q – удельный двухсторонний приток к траншее;

$$r_{0\phi} = \eta \frac{b + 2c}{4}$$

c – рабочая глубина траншеи (рис.11);

η – коэффициент, определяемый по табл.2 (гл.II, § 4) при замене $\frac{b}{d}$ на $\frac{b}{2c}$ (или на $\frac{2c}{b}$)

3. Для котлованов (зумпфов) сравнительно малых размеров ($b < m$ или $b < h_0$) можно рекомендовать пользовать-

ся следующим приближенным приемом. На уровне дна котлована проводится условная "водоупорная" горизонтальная плоскость. Приток из верхней зоны определяется, как для совершенных выработок, а из нижней - по формуле /18/:

$$Q = \frac{2\pi k m S_0}{\frac{2\pi}{\bar{Q}_r} + \ln\frac{R}{m}}, \qquad (III.13)$$

где $\bar{Q}_r$ определяется по графику, представленному на рис.12.

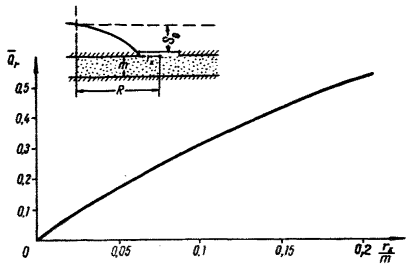


Рис.12.

В. В неоднородных и слоистых толщах.

1. Для учета несовершенства в неоднородных и слоистых толщах в общем случае необходимо использовать моделирование.

2. Для характерного случая, изображенного на рис.11в, при $\frac{k}{k_1} > 10$ и $b < 2m_1$ может быть рекомендована формула (III.12) при замене k на k_1 и m на $4m_1$[30] ; при $b > 2m_1$ можно использовать формулы, приведенные в табл.4 (гл.II § 5).

3. Применение различных эмпирических формул для учета несовершенства в слоистых толщах не рекомендуется.

§ 3. Учет величины участка высачивания

Для определения положения депрессионной поверхности в области, прилежащей к дрене, необходимо учитывать наличие участка высачивания.

1. Величина участка высачивания на откосах карьера (котлована).

а. Совершенный незатопленный котлован /28/:

$$h_b = \frac{q_0}{k}(m + 0{,}5), \qquad (Ш.14)$$

где m - заложение откоса выработки ($m > 1$). При $0 < m < 1$ более точные результаты дает формула:

$$h_b = 0{,}75\frac{q_0}{k}(m + 1). \qquad (Ш.14а)$$

б. Совершенный затопленный котлован /29/:

$$\frac{q_0}{k} = \frac{h_b}{m_c + 0{,}5}\left[1 + \frac{h_к}{h_b + \frac{m_м\, h_к}{2(m_c + 0{,}5)(m_м + 0{,}5)}}\right], \qquad (Ш.15)$$

где m_c и $m_м$ - заложения надводной и подводной частей откоса.

в. Несовершенный незатопленный котлован /29/:

$$\frac{q_0}{k} = \frac{h_b}{m}\left(1 + \frac{T}{h_b + \frac{0{,}45}{m}T}\right). \qquad (Ш.16)$$

г. Несовершенный затопленный котлован /29/:

$$\frac{q_0}{k} = \frac{h_b}{m_c}\left[1 + \frac{h_к}{h_b + \frac{h_к}{(2 + 1/m_м)m_c}} + \frac{T}{h_b + h_к\frac{m_м}{m_c} + 0{,}45\frac{T}{m_c}}\right] \qquad (Ш.17)$$

2. Величина участка высачивания на стенках дренажного штрека определяется формулой /14/

$$h_b = 0{,}44\frac{q}{k}, \qquad (Ш.18)$$

где q - удельный односторонний приток к выработке.

3. Величина участка высачивания в скважинах.

а. Величина участка высачивания для скважин с неза-

топленным фильтром (в том числе и взаимодействующих) определяется по формуле /10/:

$$h_b = \sqrt{\left(0{,}73 \lg \frac{\sqrt{Q_c/K}}{r_c} - 0{,}51\right) \frac{Q_c}{K} + h_c^2} - h_c . \quad (III.19)$$

Эта формула применима и в случае несовершенных скважин, но при этом глубина воды в скважине h_c заменяется высотой столба воды в ней.

б. При расчетах притоков к скважинам в формулы следует подставлять отметку уровня воды внутри скважины, без учета высоты промежутка высачивания; в частности, при расчете притоков к сквозным фильтрам глубина воды в них должна приниматься равной нулю. Однако не следует толковать указанное положение /27/ слишком абсолютно. Дело в том, что наличие "гидравлического скачка" на контуре скважины обусловлено двумя факторами: 1) резкой деформацией линий тока вблизи скважины и 2) сопротивлением фильтра и дополнительным сопротивлением призабойной зоны (при наличии кольматации). Формула (III.19) учитывает только первый фактор, второй же фактор должен учитываться при расчетах с помощью специальных решений (§ 4) или по результатам наблюдений за действующими скважинами.

§ 4. Учет сопротивления фильтров и песчано-гравийного заполнителя скважины

1. Сопротивление, обусловленное наличием фильтра (перфорированной трубы), учитывается путем введения расчетной величины радиуса скважины r_c', которая определяется по формуле /27/:

$$r_c' = \alpha' r_c, \quad (III.20)$$

где

$$\alpha' = \exp\left(-\frac{2\pi\delta}{Dn\bar{l}}\right), \quad (III.21)$$

$$\exp(-x) = e^{-x},$$

D – диаметр фильтрового отверстия в см;

n – число отверстий на 1 м перфорированной части трубы;

о величине $\bar{\tau}$ – см. § 2.

2. Для скважин, оборудованных песчано-гравийным заполнителем, дополнительное фильтрационное сопротивление учитывается путем введения расчетной величины радиуса скважины r_c'' .

а. Если скважина имеет заполнение в пределах рабочей части фильтра (мощности пласта), то величина r_c'' определяется по формуле /10/:

$$r_c'' = \alpha'' r_c, \qquad (III.22)$$

где

$$\alpha'' = e^{-\frac{K}{K_c}\left(\frac{m}{r_c}\right)^2 \cdot B} \qquad (III.23)$$

K_c – коэффициент фильтрации заполнителя;

B – находится по графику, представленному на рис.13.

б. Если скважина имеет заполнение не только в пределах рабочей части фильтра, но также и несколько выше (самоизливающие скважины) или ниже (поглощающие скважины), то учет сопротивления производится по формуле (III.22) с заменой B на $B_1 = B + 2\frac{m_1}{m}$ (рис.13).

3. При определении величины участка высачивания в скважинах дополнительный "скачок" уровня Δh за счет наличия перфорированного фильтра или песчано-гравийного заполнителя вычисляется по формуле:

$$\Delta h = S_c \left(1 - \frac{Q_c'}{Q_c}\right), \qquad (III.24)$$

где Q_c и Q_c' – расход скважины, вычисленный, соответственно, без учета и с учетом сопротивления перфорированного фильтра или песчано-гравийного заполнителя.

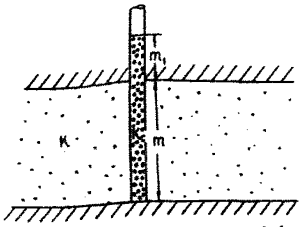


Схема скважины с песчано-гравийным заполнением

§ 5. О водозахватной способности скважины

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

при условии $Q_{вз} < Q_{расч.}$ ($Q_{расч.}$ – расчетный приток к скважине) скважина будет работать при расходах $Q_c = Q_{вз}$.

Для определения величины $Q_{вз}$ обычно пользуются формулой /1/:

$$Q_{вз} = 2\pi r_ф \cdot l_ф \cdot v_к \,, \qquad (III.25)$$

где $v_к = 65\sqrt[3]{K}$, $r_ф$ – радиус фильтра (или гравийной обсыпки) и $l_ф$ – длина рабочей части фильтра. Приведенная формула является эмпирической, а поэтому следует, по возможности, определять водозахватную способность на основе опытных данных. Для скважин, работающих в трещиноватых породах, формула (III.25) вообще неприменима.

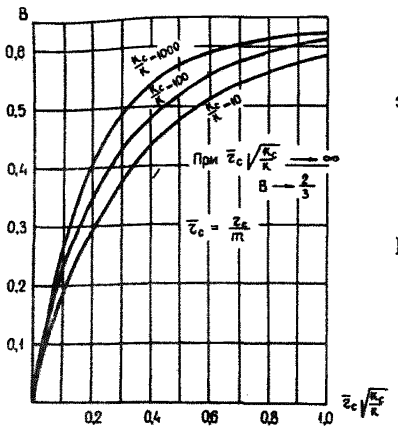


Рис.13 График для определения величины B в зависимости от параметра $\bar{r}\sqrt{\frac{K_c}{K}}$.

ГЛАВА 1У

РАСЧЕТЫ ФИЛЬТРАЦИИ К ОТКРЫТЫМ ГОРНЫМ ВЫРАБОТКАМ

§ 1. Расчеты установившейся фильтрации в типовых условиях

А. При отсутствии питания по площади

1. Одиночные выработки.

а. Общий приток определяется по формуле большого колодца (II.4).

б. Для нахождения распределения притоков по участкам, а также для определения сниженных уровней следует вести расчет по выделенным лентам тока (§ 2, п.А1) или определять все искомые характеристики потока непосредственно на модели.

2. Взаимодействующие выработки.

а. Для определения общих притоков к взаимодействующим горным выработкам, приведенным к "большим колодцам", решается система уравнений /22/:

$$\begin{aligned} Q_1' \lg R_1 + Q_2' \lg \frac{R_2}{\rho_{1-2}} + Q_3' \lg \frac{R_3}{\rho_{1-3}} + \ldots\ldots Q_n' \lg \frac{R_n}{\rho_{1-n}} &= D_1 + Q_1' \lg r_{к1}\,, \\ Q_1' \lg \frac{R_1}{\rho_{n-1}} + Q_2' \lg \frac{R_2}{\rho_{n-2}} + Q_3' \lg \frac{R_3}{\rho_{n-3}} + \ldots\ldots Q_n' \lg R_n &= D_n + Q_n' \lg r_{кn}\,, \end{aligned} \qquad (1У.1)$$

где $\rho_{i-к}$ – расстояние между i -ой и $к$ -ой выработками; $D_i = 1{,}36к\,(2h_\sigma - S_i)\,S_i$;

R_i -условный радиус влияния для i -ой выработки.

б. Во всех прочих случаях необходимо привлечение моделирования - или только для построения лент тока, или для определения всех искомых величин на модели.

Б. Особенности расчета при наличии питания по площади (некоторые частные случаи)

1. Определение притоков с учетом инфильтрации.

а. Инфильтрацию следует учитывать в расчетных схемах лишь в тех случаях, когда величина ее отличается от "естественной" (гл.1 § 4 п.3).

б. Если инфильтрация имеет место вдоль некоторого линейного контура (например, река с закольматированным руслом) или полосы, то в условиях плоскопараллельного движения ее можно учесть, прибавляя к расчетным удельным притокам величину:

$$q_д = w_0 \frac{l_1}{l_1 + l_2}, \qquad (1\,У.2)$$

где w_0 - интенсивность инфильтрации с 1 пог.м контура (полосы).

в. 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 (гл.У).

Прочие случаи расчета инфильтрации (даже типовые) требуют привлечения моделирования.

2. Определение притоков с учетом перетекания.

а. Определение притоков при питании (или разгрузке) водоносных горизонтов за счет перетекания представляет наибольший интерес в случае, когда открытые горные вы-

работки вскрывают горизонт, который питается (или разгружается) за счет гидравлической связи с другим, более водообильным горизонтом, залегающим ниже или выше рассматриваемого и отделенным от него относительным "водоупором", причем уровни водообильного горизонта не зависят от перетекания. Такое предположение справедливо при соотношении проводимостей (km), превышающем 20÷40. При этом возможны следующие типовые схемы:

1) если поверхность уровня водообильного питающего горизонта может считаться горизонтальной (рис. 14а), то перетекание в случае неограниченного пласта учитывается в выражении радиуса влияния (гл.II § 3 п.Б).

2) если уровень водообильного горизонта – переменный, а рассматриваемый горизонт – неограниченный (рис.14б), то осесимметричный приток к выработке, приведенной к "большому колодцу", расчитывается по формуле /26/:

$$Q = 2\pi mk\left[(\Delta H_2 - J_н m_b)\sqrt{\xi}\, r_к \frac{K_1(r_к\sqrt{\xi})}{K_0(r_к\sqrt{\xi})} + A_0\right], \qquad (1У.3)$$

где ΔH_2 – разность уровней горизонтов на контуре дренажа;

$J_н$ – начальный градиент для разделяющего водоупора;

K_0 и K_1 – функции Бесселя второго рода – соответственно, нулевого и первого порядков /32/ (см.вспомогательный график – рис.3);

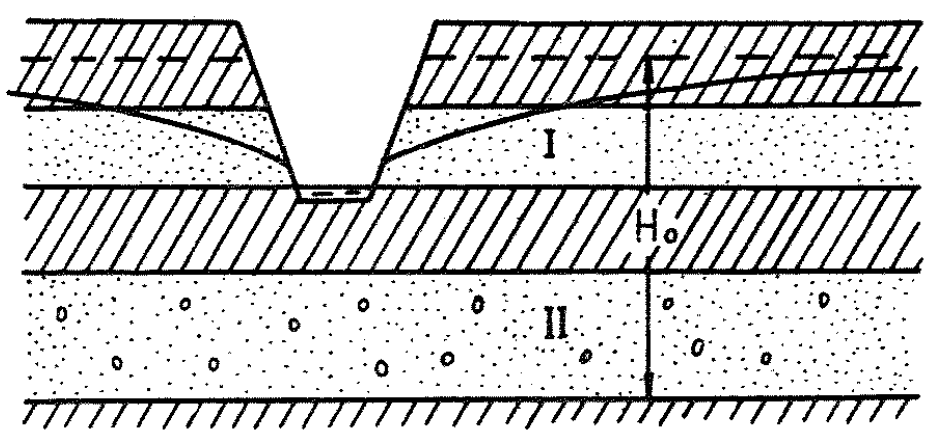
$$\xi = \frac{k_b}{km m_b}\ ; \qquad A_0 = \frac{Q_п}{2\pi k_п m_п}$$

$Q_п$ – расход, поступающий в выработку из водообильного горизонта; индексы „b" и „п" относятся, соответственно, к разделяющему водоупору и водообильному горизонту.

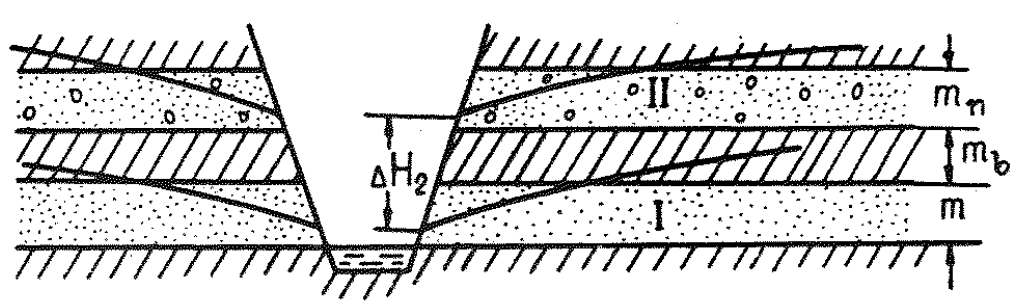
Плоскопараллельный поток в аналогичных условиях расчитывается по формуле /26/:

$$q = km\left[\frac{h_{1п} - h_{2п}}{L} + \sqrt{\xi}\,(\Delta H_2 - J_н m_п)\right]. \qquad (1У.4)$$

а



б



в

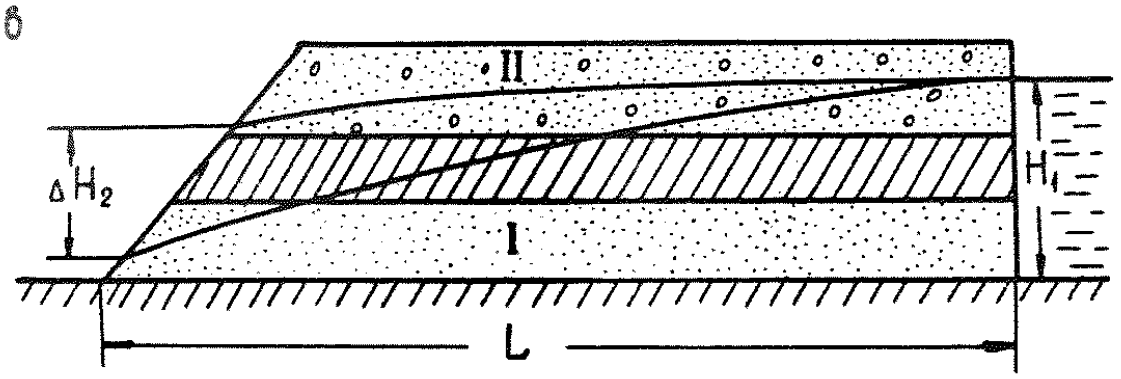


Рис.14. Схемы к расчету "перетекания".

3) ограниченный напорный плоскопараллельный поток с постоянным уровнем на внешней границе рассчитывается по формуле /26/:

$$q = km\left[A_{пл} + \sqrt{\xi}\,(C_2 - C_1)\right], \qquad (1У.5)$$

где C_2 и C_1 определяются из системы:

$$C_1 + C_2 = -\left(\Delta H_2 - J_н m_b\right)$$

$$C_1 e^{-L\sqrt{\xi}} + C_2 e^{L\sqrt{\xi}} = -\left(\Delta H_1 - J_н m_b\right),$$

L – расстояние между контуром дренажа и контуром питания;

ΔH_1 – разность уровней на контуре питания;

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

При питании обоих горизонтов из одного источника (рис.14к) и при $J_н = 0$:

$$q = km\left(A_{пл} + \sqrt{\xi}\,\Delta H_2\,\frac{e^{2L\sqrt{\xi}} + 1}{e^{2L\sqrt{\xi}} - 1}\right); \qquad (1У.5а)$$

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

$$Q = \frac{2\pi km\,S}{K_0(r_k\sqrt{\xi}) \pm K_0(2R\sqrt{\xi})}, \qquad (1У.6)$$

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

5) для безнапорных водоносных горизонтов в аналогичных условиях применимы, с некоторой долей приближения, формулы (1У.3–1У.6) при замене в них величины " m " на

$$h_{ср} = \frac{h_1 + h_2}{2}$$

б. В случаях, когда проводимости (km) 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 случая, изображенного на рис.15, условие полного

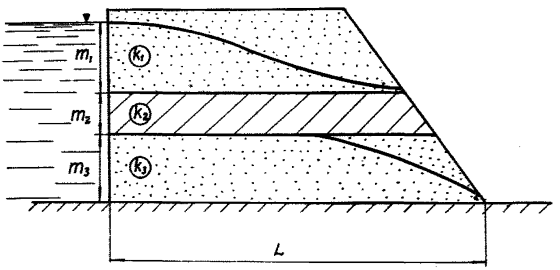


Рис.15. Схема к расчету фильтрации в случае трехслойного сложения откоса.

устранения выхода воды на откос в пределах верхнего горизонта записывается в виде /30/:

$$m_2 + m_3 \geqslant \frac{8 k_3 m_1 m_2 m_3}{k_2 L^2} \left(\sqrt{1+\varepsilon^2} - \varepsilon \right), \qquad (1.У.7)$$

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

В этом случае расход нижнего горизонта определяется формулой:

$$q = \frac{k_3 m_3 (m_1 + m_2 + m_3) + 0{,}5 k_1 m_1^2}{L} ; \qquad (1У.8)$$

в. В прочих (даже типовых) случаях в целях учета перетекания через относительные "водоупоры" следует пользоваться методами моделирования.

§ 2. Расчеты установившейся фильтрации в сложных условиях

1. Все расчеты требуют предварительного построения сетки движения на аналоговых моделях.

2. Притоки и уровни могут определяться или непосредственно на модели или (при отсутствии дополнительного питания по площади) по выделенным лентам тока (гл.II § 1) после приведения их к плоским (гл.II § 2); в последнем случае основной расчетной формулой служит формула (П.3).

§ 3. Расчет неустановившейся фильтрации в простейших частных случаях

1. Осесимметричная фильтрация в неограниченном пласте при отсутствии дополнительного питания по площади.

а. Общий приток к открытой горной выработке, приведенной к "большому колодцу", в условиях неограниченного пласта может быть определен по формуле /28/:

$$Q = \frac{\pi k (h_1^2 - h_2^2)}{\ln \frac{R(t)}{r_к}}, \qquad (IУ.9)$$

где $R(t)$ определяется формулой (II.6).

б. Ординаты депрессионной поверхности в зоне влияния выработки, можно определить по формуле /6/:

$$h_r = \sqrt{h_e^2(r) - (h_1^2 - h_2^2)[1 - R(\gamma, \bar{r})]}, \qquad (IУ.10)$$

где $h_e(r)$ – мощность потока в естественных условиях в расчетной точке;

$R(\gamma, \bar{r})$ – табулированная функция (рис.16);

$$\gamma = \frac{at}{r_к^2}, \qquad \bar{r} = \frac{r}{r_к},$$

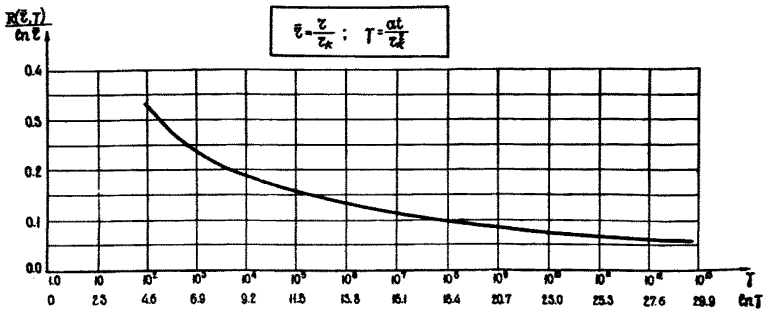


Рис.16. График функции $R(\bar{r},\tau)$.

Примечание: график применим при $10<\bar{r}<2500$
$10^2<\tau<10^{13}$

r - расстояние от оси выработки до расчетной точки.

2. Плоско-параллельная фильтрация при отсутствии дополнительного питания по площади.

а. Расход определяется по следующим формулам /24/:

1) для полуограниченного потока, единственной границей которого является сам карьер,

$$q = \frac{k(h_2'^2 - h_2''^2)}{2\sqrt{\pi a t}} + q_e ; \qquad (1У.11)$$

2) для потока, ограниченного карьером и контуром с постоянным напором

$$q = \frac{k(h_2'^2 - h_2''^2)}{2L}\left[S_q(\tau)+1\right] + q_e ; \qquad (1У.12)$$

3) для потока, ограниченного карьером и слабопроницаемым контуром, на котором задан постоянный расход

$$q = \frac{k(h_2'^2 - h_2''^2)}{2L} T_q(\tau) + q_e , \qquad (1У.13)$$

где q_e - расход потока в естественных условиях;

$Sq(\tau)$ и $Tq(\tau)$ - табулированные функции (рис.17,18).

h'_2 и h''_2 – первоначальная и сниженная глубины на контуре карьера.

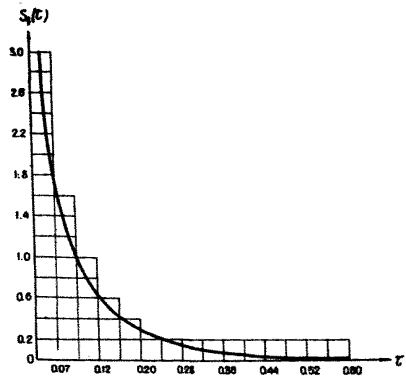


Рис.17. График функции $S_q(\tau)$.

Формулы (1У.11) –(1У.13) выведены для условий мгновенного изменения уровня на контуре стока (от h'_2 до h''_2). Так как на самом деле снижение уровня h_2 идет постепенно, то целесообразно вносить в расчет поправки /30/: в период изменения уровня h_2 вводить расчетное время $t_p \approx 0{,}55\,t$, а для периода постоянного уровня h_2 –принимать расчетное время $t_p \approx t - 0{,}45\,t_1$ (t_1 –продолжительность первого периода).

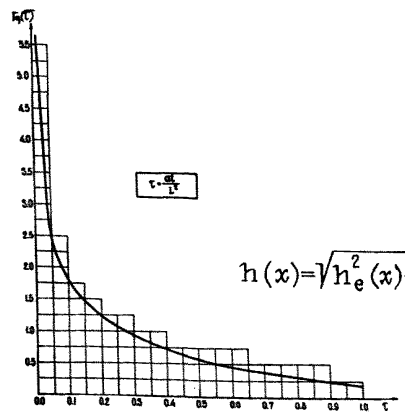


Рис.18. График функции $T_q(\tau)$.

б. Ординаты кривой депрессии определяются по следующим выражениям /24/:

1) для полуограниченного потока:

$$h(x)=\sqrt{h_e^2(x)-(h_2'^2-h_2''^2)[1-\Phi(\lambda)]}; \qquad (У.14)$$

2) для потока, ограниченного карьером и контуром с постоянным напором:

$$h_x=\sqrt{h_e^2(x)-(h_2'^2-h_2''^2)\left[1-\frac{x}{L}-S\left(\tau,\frac{x}{L}\right)\right]}; \qquad (1У.15)$$

3) для потока, ограниченного карьером и слабопроницаемым контуром:

$$h_x = \sqrt{h_e^2(x) - (h_1'^2 - h_2''^2)\left[1 - T\left(\tau, \frac{x}{L}\right)\right]}, \qquad (1У.16)$$

где x – расстояние от контура дренажа до расчетной точки;

$h_e(x)$ – естественная глубина потока в расчетной точке;

$\Phi(\lambda)$, $S\left(\tau, \frac{x}{L}\right)$, $T\left(\tau, \frac{x}{L}\right)$ – функции, определяемые по графикам (рис.19); $\lambda = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$, $\tau = \frac{at}{L^2}$

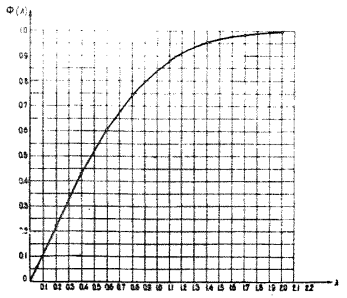


Рис.19а. График функции $\Phi(\lambda)$.

При $\tau < 0{,}13$

$$S\left(\frac{x}{L}, \tau\right) = \Phi(\lambda) - \frac{x}{L};$$

при $\tau > 0{,}3$

$$S\left(\frac{x}{L}, \tau\right) = \frac{2}{\pi} \sin\pi\frac{x}{L} \cdot \exp(-\pi^2\tau);$$

при $\tau < 0{,}08$

$$T\left(\frac{x}{L}, \tau\right) = \Phi(\lambda);$$

при $\tau > 0{,}8$

$$T\left(\frac{x}{L}, \tau\right) = \frac{4}{\pi} \sin\frac{\pi}{2}\frac{x}{L} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2}{4}\tau\right)$$

в. Формулы (1У.11)-(1У.16) рекомендуются к применению только для сильно вытянутых выработок ($\frac{d}{b} > 5 \div 10$) в следующих условиях:

1) формулы (1У.11) и (1 У.14) – при $t < \frac{d^2}{4\pi a}$;

2) формулы (1У.12), (1У.13), (1У.15) и (1У.16) – для расчета притоков и уровней со стороны карьера, обращенной к параллельной его оси внешней границе пласта, при выполнении соотношения $\frac{L}{d} < 0{,}5$. Более широко все эти формулы могут применяться при расчетах по лентам тока (§ 4).

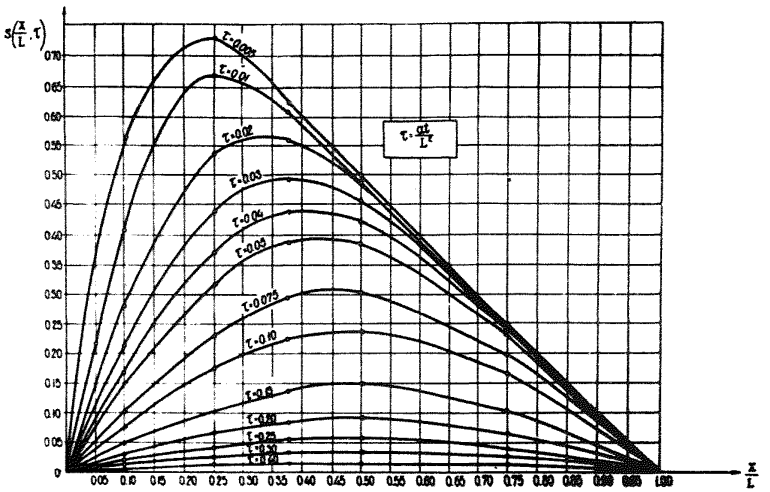


Рис.19б. График функции $S\left(\frac{X}{L};\tau\right)$.

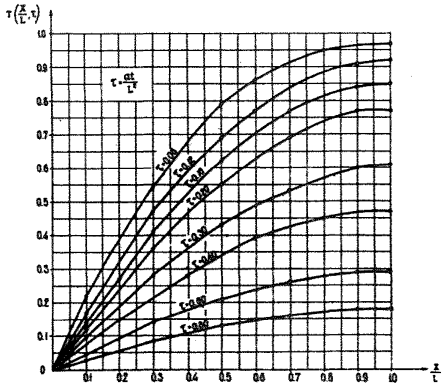


Рис.19в. График функции $T\left(\frac{X}{L};\tau\right)$.

3. Для карьера, приведенного к большому колодцу и вскрывающего полуограниченный пласт с постоянным напором на границе /16/:

$$Q=\frac{\pi k\,(h_1^2-h_2^2)}{\ln\frac{2R_*}{r_к}-f_1\left(\frac{\sqrt{\pi a t}+r_к}{R_*}\right)},\qquad (1У.17)$$

где R_* - расстояние от центра карьера до границы пласта; f_1 - определяется по графику, представленному на рис.20. Формула (1 У.17) применима при $\frac{R_*}{r_к}>5$.

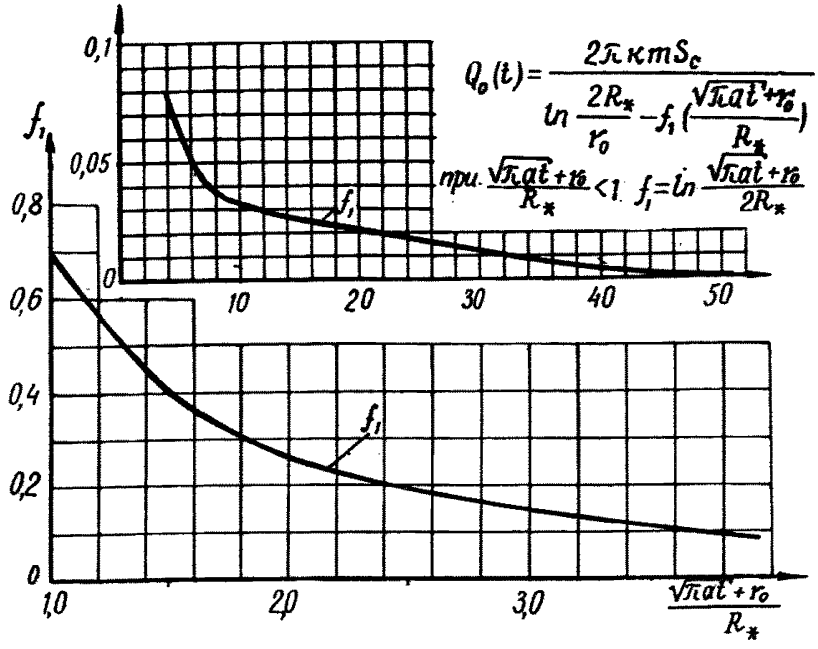


Рис.20.

§ 4. Расчет неустановившейся фильтрации в сложных условиях x)

А. В условиях однородных или приводимых к однородным пластов

1. Приближенный расчет водопритоков может быть произведен по характерным лентам тока, на основании принципа недеформируемых линий тока (гл.II § 1). В соответствии с этим принципом считается, что боковые границы лент тока не меняют своего положения (по отношению к сетке движения в условиях установившегося потока), а перемещается только внешний контур ленты.

2. Расчет ведется в следующей последовательности /26/:

а) методом ЭГДА или графически строится "сетка движения", отвечающая установившемуся режиму фильтрации,

---

x) Сюда же относятся и некоторые типовые условия, которые не охватываются решениями, приведенными в § 3.

и выделяются характерные расчетные ленты тока (гл.II § 1);

б) для первых этапов движения, пока влияние границ пласта практически не сказывается на величинах водопритоков, расчет можно вести по формуле (1 У.9). При $t > t_0 = \frac{R^2_{об}}{\pi a}$, где $R_{об}$ - кратчайшее расстояние до ближайшей границы пласта, расчет производится по выделенным лентам тока;

в) в пределах ленты по формуле (П.6) определяется положение условного контура питания для нескольких характерных моментов времени $t_1; t_2 \ldots t_n$, где $t_1 = t_0$, а t_n находится из условия $R(t_n) = R_{дл}$, $R_{дл}$ - расстояние от карьера до внешней границы ленты, взятое по средней линии тока;

г) выделенные таким образом участки ленты тока, имеющие длины, равные $R(t_1); R(t_2), \ldots R(t_n) = R_{дл}$ (начало отсчета - на контуре карьера), приводятся к плоским посредством введения фиктивной длины пути фильтрации $R'(t_i)$ - согласно гл.II § 2;

д) расчет притока к карьеру в пределах ленты на момент $t_i \leqslant t_n$ ведется по формуле:

$$Q_{t_i} = k \frac{h^2_{t_i} - h^2_2}{2 R'_{t_i}} \cdot b_к, \qquad (1У.18)$$

где h_{t_i} - естественная глубина потока на условном контуре питания; $b_к$ - ширина ленты по контуру карьера;

е) при $t > t_n$ расчет в пределах ленты ведется по формулам:

$$Q_t\big|_{t>t_n} = k \frac{h^2_1 - h^2_2}{2 R'_{дл}} \cdot b_к - \qquad (1У.19)$$

- при заданном постоянном напоре на внешней границе ленты и

$$Q_t\big|_{t<t_n} = k \frac{h^2_1 - h^2_2}{2 R'_{дл}} \cdot T_q(\tau) \cdot b_к - \qquad (1У.20)$$

– при заданном расходе на внешней границе ленты (через h_1 обозначена естественная глубина на внешней границе пласта).

Пример расчета приведен в приложении № 1.

3. При наличии естественного потока притоки уже в первые моменты ($t < t_0$) будут существенно разными на отдельных участках контура карьера. Если в этих условиях время t_0 велико, то возникает необходимость в определении притоков по отдельным участкам и на первоначальном этапе работы карьера. Для этого можно строить ленты тока для нескольких промежуточных моментов времени ($t < t_0$), принимая последовательно за границу пласта с постоянным напором характерные гидроизогипсы естественного потока. Для каждой такой гидроизогипсы расчет ведется в том же порядке, что и для действительной границы, до момента времени, отвечающего условию $R(t) = R_{i\partial}$, где $R_{i\partial}$ – минимальное действительное расстояние от карьера до выделенной гидроизогипсы.

4. В тех случаях, когда требуется повышенная точность расчета, целесообразно находить положение линий тока на несколько моментов времени посредством моделирования.

5. Учет дополнительной инфильтрации и перетекания требует привлечения моделирования. Однако при определении притоков к открытым горным выработкам не следует стремиться к детальному учету перетекания в условиях неустановившегося режима фильтрации[x], так как, с одной стороны, точность определения расчетных параметров перетекания обычно невысока, а с другой стороны, если перетекание имеет существенное значение (о чем можно судить из приближенных оценок – гл.1 § 5), то сравнительно быстро наступает установившийся режим фильтрации.

6. Изложенный метод применим лишь для расчета притоков и не может использоваться в целях определения уровней.

---

x) Это, конечно, не относится к методике обработки опытных полевых работ.

Приближенную их оценку можно получить, исходя из формулы /30/:

$$h_{(x)}=\sqrt{h^2_{e(x)}-\left(h^2_{e(x)}-h^2_{y(x)}\right)\frac{h^2_{e(x)}-h^2_{t_0(x)}}{h^2_{e(x)}-h^2_{y_0(x)}}}\quad , \qquad (1У.21)$$

где h_y – глубина в расчетной точке при установившемся движении;

h_{y_0} – установившаяся глубина в расчетной точке, рассчитанная как для плоскопараллельного движения, по формуле (113);

h_{t_0} – глубина в расчетной точке, рассчитанная, как для плоскопараллельного движения, по одной из формул (1У.14)-(1У.16). Координата x отсчитывается вдоль оси ленты тока. Пример расчета приведен в приложении № 1.

Такой расчет дает ошибку до 20-25%. Более точные результаты можно получить путем моделирования и расчетом по методу конечных разностей.

7. Для расчета по методу конечных разностей область фильтрации разбивают по квадратной сетке с шагом Δl, после чего уровни определяются по формуле /3/:

$$\frac{h_{n,i,t+1}-h_{n,i}}{\Delta t}=\frac{a}{(\Delta l)^2}\left(h_{n-1,i}+h_{n+1,i}+h_{n,i-1}+h_{n,i+1}-4h_{n,i}\right), \qquad (1У.22)$$

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

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

Величина Δl выбирается так, чтобы она удовлетворяла соотношению

$$\frac{a\Delta t}{(\Delta l)^2}\leqslant\frac{1}{4} \qquad (1У.23)$$

Если принять $\frac{a\Delta t}{(\Delta l)^2} = \frac{1}{4}$, то уравнение (1У.22) примет вид

$$h_{n,i,t+1} = \frac{h_{n-1,i} + h_{n+1,i} + h_{n,i-1} + h_{n,i+1}}{4} \quad . \qquad (1У.22\text{-а})$$

Определение уровней осуществляется последовательным расчетом от квадрата к квадрату.

Б. В условиях неоднородных пластов следует ориентироваться на моделирование или на метод конечных разностей; однако применение последнего связано с весьма громоздкими вычислениями.

§ 5. Учет некоторых дополнительных факторов

А. Учет скорости снижения уровня в затопленном карьере (v_1)

1. Для выработки, приведенной к большому колодцу, в условиях неограниченного пласта расчет притока ведется по формуле (1У.9) при величине $R(t)$, определяемой формулой (II.6а).

2. Для условий плоскопараллельного движения, наряду с приближенным приемом, описанным в § 3 п.2а, может использоваться формула /10/:

$$q_{он} = q_{оу}\left[1 - P(n)\right] + k\,\frac{h_{ку} - h_{кн}}{2m_0}\,P(n), \qquad (1У.24)$$

где $q_{он}$ и $q_{оу}$ – удельный приток на момент t (считая от начала снижения) и первоначальный удельный приток; $h_{ку}$ и $h_{кн}$ – первоначальная глубина воды в котловане и глубина на момент t ; m_0 – заложение откоса,

$$n = \frac{m_0 v_1}{2}\sqrt{\frac{t}{a}} \ ,$$

$P(n)$ определяется по графику, представленному на рис.21.

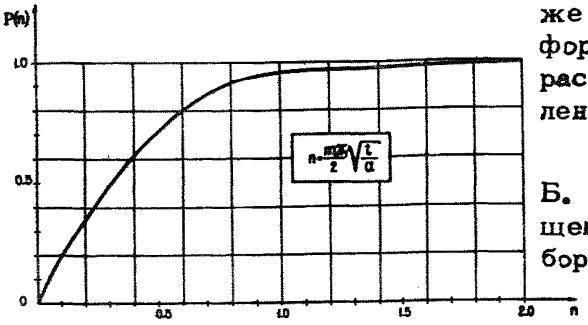


Рис.21. График функции $P(n)$.

3. В прочих случаях также можно пользоваться формулой (1У.24) – при расчете по выделенным лентам тока (§ 4).

Б. Учет скорости перемещения фронта рабочего борта карьера (v).

1. Для условий плоскопараллельной фильтрации такой учет может осуществляться с помощью формулы /26/:

$$q = k\,\frac{h_1^2 - h_2^2}{2a\,l_0}\,v\,, \qquad (1У.25)$$

Величина l_0 находится по графику (рис.22) в зависимости от величины $t_0 = \frac{v^2}{2a}\,t$.

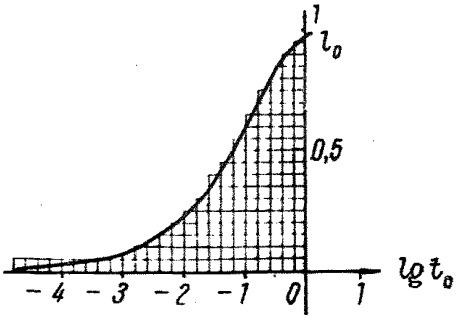


Рис.22. График $l_0 = f(t_0)$.

Формулой (1У.25) можно пользоваться при условии

$$\frac{2a\,l_0}{v} + v\,t < L\,, \qquad (1У.26)$$

где L – первоначальное расстояние от борта до области питания. При $t_0 > 1{,}0$ можно считать:

$$q = \frac{k\,(h_1^2 - h_2^2)}{2a}\,v = const\,. \qquad (1У.27)$$

2. Формулами (1У.25)–(1У.27) можно пользоваться и в других условиях – после выделения характерных лент тока и проведения их к плоским (§ 4).

3. Скорость перемещения v имеет смысл учитывать при $\frac{v^2}{2a}t > 0{,}05$.

4. Решение (1У.25-1У.27) исходит из предпосылки о плавном движении борта с постоянной скоростью v. На самом деле это движение осуществляется "скачками", отвечающими очередным заходкам экскаватора. Если принять, что ширина заходки равна ΔL, а время продвижения борта на величину ΔL равно Δt, то увеличение расхода за счет такого "скачка" можно учесть следующим образом:

а) определяется приток к откосу $q_0(t_i)$ на момент t_i, предшествующий очередной заходке экскаватора, исходя из предпосылки, что до этого момента борт был неподвижен или двигался с постоянной (осредненной во времени) скоростью v;

б) по величине притока $q_0(t_i)$ посредством формулы (II.3) определяется уровень в точке $x = \Delta L$, т.е. $h(t_i, \Delta L)$;

в) определяется максимальный приток к откосу после очередной заходки экскаватора:

$$q(t_i + \Delta t) = q_0(t_i) + \Delta q, \qquad (1У.28)$$

где

$$\Delta q = \frac{k h^2(t_i; \Delta L)}{2\sqrt{\pi \cdot a \cdot \Delta t}} . \qquad (1У.29)$$

В дальнейшем расход постепенно падает, так что через сравнительно короткое время величина его будет соответствовать расходам, подсчитанным исходя из допущения о плавном движении борта (до следующей заходки экскаватора).

Пример расчета приведен в приложении № 2.

В. Определение суммарного водопритока при вскрытии напорного горизонта в подошве карьера

Суммарное поступление воды в зумпф, вскрывающий напорный горизонт в подошве карьера, от момента вскрытия до момента t_0, может быть рассчитано по формуле /26/:

$$Q_{сум} = \frac{4\pi k m S r_к^2}{2{,}25\,a^*}\,\bar{E}_i\left(\ln\frac{2{,}25\,a^* t_0}{r_к^2}\right). \qquad (IУ.30)$$

Формулой (IУ.30) следует пользоваться при условии $\frac{r_к^2}{a^* t_0} < 0{,}05$. Значения функции $\bar{E}_i(x)$ приведены в табл.5 /32/.

Таблица 5

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

Г. Расчет снижения напоров в подошве карьера, вызванного выемкой пород

Заметное влияние на разгрузку напорных водоносных горизонтов, приуроченных к слабофильтрующим породам, может оказывать уменьшение давления на водоносный пласт, связанное с выемкой вышележащих пород. Величина понижения напора ΔS_p определяется по формуле /10/:

$$\Delta S_p = -\frac{v_к\, dt}{a^*} \cdot \frac{1}{4\pi} E_i\left(-\frac{r_к^2}{4a^* t}\right), \qquad (1У.31)$$

где $E_i(-x)$ – интегральная экспоненциальная функция (табл.8);

$v_к$ – скорость заглубления карьера.

Д. Учет перемещения контура обводненности пласта

При оценке притоков к карьеру, который вскрывает мульдообразно залегающий водоносный пласт, характеризующийся затрудненным питанием, или водоносную линзу, может возникнуть необходимость в учете постепенного перемещения контура обводненности в процессе истощения мульды (линзы).

1. Для случая плоскопараллельного безнапорного движения рекомендуются графики, приведенные на рис.23 /17/. Время полного истощения статических запасов в этих условиях определяется формулой /17/:

$$t \approx \frac{2{,}56\,\mu L}{k \cdot i}. \qquad (1У.32)$$

График (рис.23) и формула (1У.32) не учитывают инфильтрацию.

2. Для случая плоскопараллельного напорного движения изменение длины области фильтрации l определяется зависимостью:

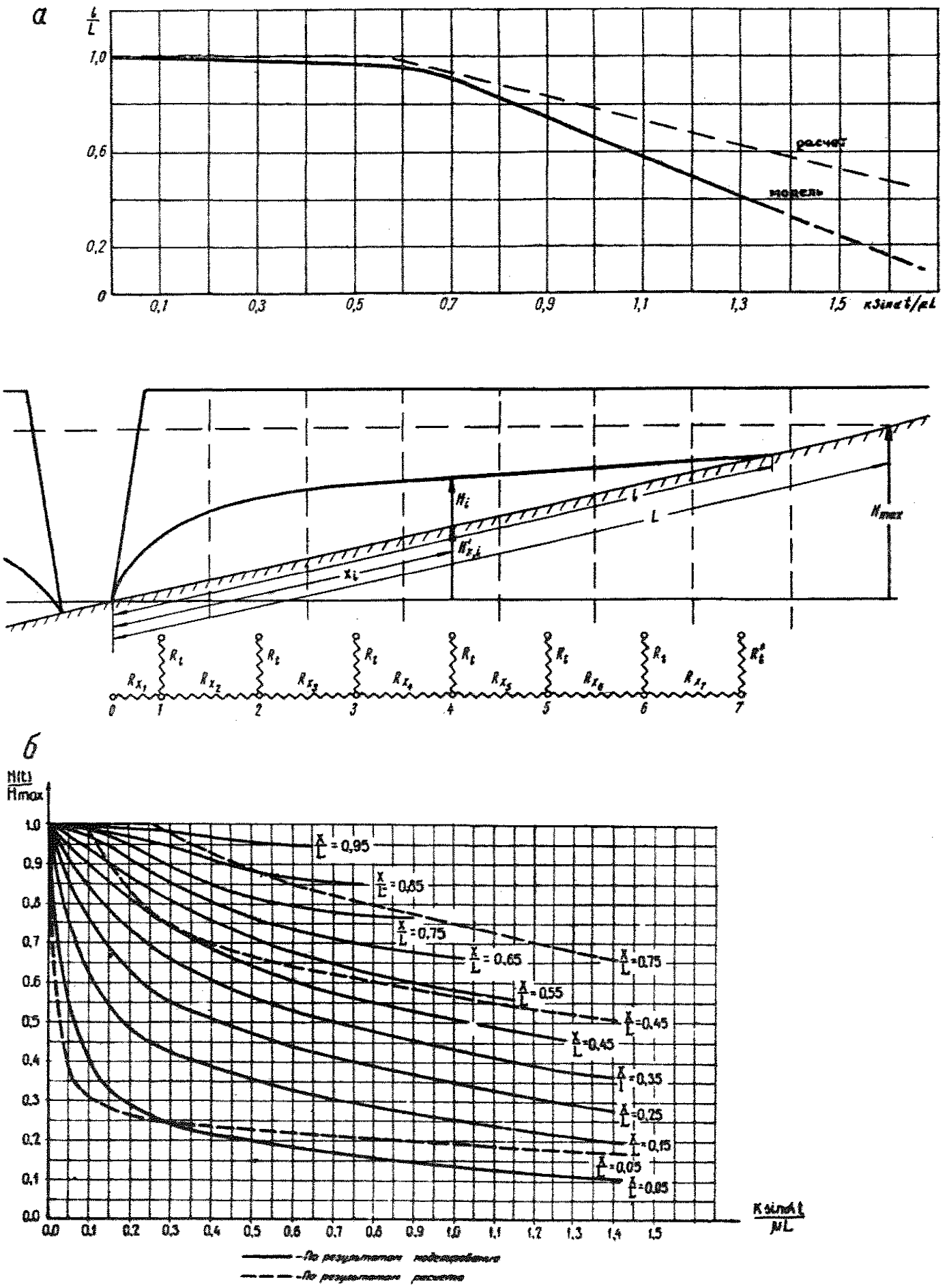

а
расчет
модель
б
X/L = 0,95
X/L = 0,85
X/L = 0,75
X/L = 0,65
X/L = 0,55
X/L = 0,45
X/L = 0,35
X/L = 0,25
X/L = 0,15
X/L = 0,05
X/L = 0,05

Рис.23.

$$\tau = L - \frac{ki}{\mu} t \quad . \qquad (1У.33)$$

3. В общем случае расчет рекомендуется вести в следующей последовательности:

а) строятся ленты тока, отвечающие первоначальному положению контура обводненности (§ 1 гл.II); ленты приводятся к плоским (§ 2 гл.II);

б) определяется положение контура обводненности на момент Δt согласно п.1 или п.2 для каждой характерной ленты;

в) ленты тока перестраиваются согласно новому положению контура, и т.д.

Г Л А В А У.

ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН x)

Дренажные скважины могут работать либо с заданным расходом, либо с заданным понижением (гл.1, § 4, п.5б). Поэтому приводимые ниже методы расчета дифференцируются в зависимости от граничных условий на скважинах. При расчетах, в качестве первого ориентира, используются результаты предварительных упрощенных оценок (гл.1, § 5, п.8).

---

x) Приводимые в этой главе формулы могут применяться и для расчета наклонных скважин, пройденных с отклонением до 75° от вертикали /1/.

§ 1. Расчеты установившейся фильтрации в типовых условиях

1. Расчет одиночных скважин

а. Связь расхода скважины и уровня в ней описывается формулой /10/:

$$Q_c = k \frac{h_{0c}^2 - h_c^2}{2 f_c^0}, \qquad (У.1)$$

где h_{0c} – первоначальная глубина потока в точке заложения скважины;

f_c^0 – функция понижения для этой точки (табл.8).

б. Для определения уровня в любой точке пласта может применяться формула:

$$h = \sqrt{h_0^2 - \frac{2Q_c}{k} \cdot f_c}, \qquad (У.2)$$

где f_c – функция понижения для рассматриваемой точки (табл.6).

2. Расчет системы отдельно стоящих скважин.

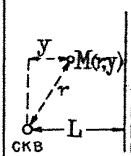
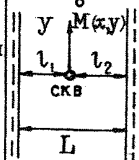
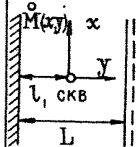
а. При заданных дебитах скважин расчет уровней ведется по формуле /10/:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2}{k} \sum_{i=1}^{n} Q_{ci} f_{ci}, \qquad (У.3)$$

где Q_{ci} – дебит i -ой скважины;

f_{ci} – функция понижения от действия скважины номер i (табл.6)

Таблица 6

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	f_c^0	f_c (в точке M)
1. В полуограниченном пласте (линейная граница с постоянным напором)		$f_c^0 = 0{,}367 \lg \frac{2L}{r_c}$	$f_c = 0{,}367 \lg \frac{\sqrt{4L^2 - 4Ly + r^2}}{r}$
2. Между двумя границами с постоянным напором		$f_c^0 = 0{,}367 \lg \times \left[\frac{2L}{\pi r_c} \cos \frac{\pi(l_1 - l_2)}{2L}\right]$	$f_c = \theta(\bar{x}; 2\bar{l}_1 + \bar{y}) - \theta(\bar{x}; \bar{y})$. $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{L}$; $\bar{x} = \frac{x}{L}$; $\bar{y} = \frac{y}{L}$; (см. рис. 24)
3. Между областью питания и непроницаемой границей		$f_c^0 = 0{,}367 \lg \times \left[\frac{4L}{\pi r_c} \operatorname{ctg} \frac{\pi l_1}{2L}\right]$	$f_c = \theta_1(\bar{x}; \bar{l}_1 + \bar{y}) + \theta_1(\bar{x}; \lvert\bar{l}_1 - \bar{y}\rvert)$ $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{L}$; $\bar{x} = \frac{x}{L}$; $\bar{y} = \frac{y}{L}$ (см. рис 24)
4. В круговом пласте с постоянным напором на контуре		$f_c^0 = 0{,}367 \lg \times \frac{R^2 - \delta^2}{R r_c}$	$f_c = 0{,}367 \lg \frac{\sqrt{R^2 + \frac{r_1^2 \delta^2}{R^2} - \delta^2 + r^2 - r_1^2}}{r}$

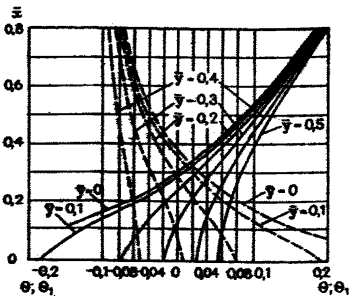


Рис.24. Графики функций θ (пунктир) и θ_1 (сплошные линии).

В частности, для равнодебитных скважин:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2Q_c}{k} \sum_{i=1}^{n} f_{ci} . \qquad (У.3а)$$

б. При заданных уровнях скважин расчет их дебитов осуществляется путем решения системы:

$$\sum_{i=1}^{n} Q_{ci} f^0_{ci} = k \frac{h^2_{0ci} - h^2_{ci}}{2} . \qquad (У.4)$$

При большом числе скважин в этом случае расчет проще всего вести на основании моделирования.

3. Расчет контурных систем скважин.

а. Проще всего расчет осуществляется с помощью построения лент тока (§ 2 п.Б).

б. Можно пользоваться и аналитической зависимостью /10/:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2}{k} \sum_{i=1}^{p} Q_{yi} f_{yi} , \qquad (У.5)$$

где p – число характерных участков контура (в пределах каждого из них расходы 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.

Функция понижения от действия ограниченного прямолинейного ряда равнодебитных и равноудаленных друг от друга скважин выражается формулой /10/:

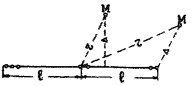
$$f_y = f_c - \Delta f , \qquad (У.6)$$

f_c – функция понижения от действия скважины, расположенной в центре ряда (определяется по табл.6),

$$\Delta f = 0{,}367 \lg \frac{r_{эф}}{r} , \qquad (У.7)$$

r – расстояние от середины ряда до точки, в которой определяется понижение;

$r_{эф}$ – расчетное расстояние от линии до точки (определяется по графику или по таблице – см.рис.25).



$\bar{z}_{зар} = \frac{z_{зар}}{\ell}$; $\bar{z}-\Delta = \frac{z-\Delta}{\ell}$; $\Delta = \frac{\Delta}{\ell}$

а) при $\Delta > 3$ $z_{зар} = z$;

б) при $1 \le \Delta < 3$ величины $\bar{z}_{зар} = \frac{z_{зар}}{\ell}$ находятся по таблице:

$\bar{z}-\Delta$		0	0,25	0,5	0,75	1,0
Δ	1	1,13	1,03	1,01	0,98	0,96
	2	1,03	1,02	1,00	0,99	0,96
	3	1,01	1,01	1,00	1,00	0,99

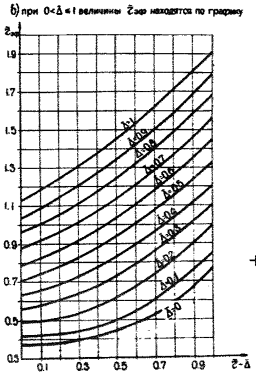


Рис.25. Схема к определению расчетного расстояния $r_{эф}$.

Если требуется найти понижение в какой-либо характерной скважине ряда, то вместо формулы (У.6) следует пользоваться формулой:

$$f_y = f_c - \Delta f + \frac{1}{n}\Phi_K, \qquad (У.8)$$

где Φ_K – определяется по номограмме (рис.7),

n – число скважин ряда.

Формула (У.6) применима при условии, что участок контура удален от границ области фильтрации на расстояние, большее половины его длины.

4. Особо отметим следующие важные частные случаи:

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

$$Q_c = \frac{0{,}5\,k\,(h_0^2 - h_c^2)}{0{,}367\lg\frac{\delta}{\pi d_c} + \frac{L}{\delta}}; \qquad (У.9)$$

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

$$Q_c = \frac{0{,}5\,k\,(h_0^2 - h_c^2)}{0{,}367\lg\frac{\delta}{\pi d_c} + \frac{l_1 l_2}{\delta(l_1+l_2)}}; \qquad (1.10)$$

в) круговой контур равнодебитных скважин, оконтуривающих "сухой" несовершенный котлован в круговом пласте с радиусом R :

$$Q_c = \frac{k(h_0^2 - h_c^2)}{0{,}367 \lg\left(\frac{R^n}{n r_к^{n-1} \cdot r_c}\right)} \quad . \qquad (У.11)$$

Во всех трех случаях для определения понижения в любой точке пласта целесообразно предварительно осуществлять замену дренажного контура фиктивной совершенной траншеей, в соответствии с формулами (III.1) - (III.2), а затем вести расчет либо по формуле (II.3) - для случаев "а" и "б", либо по формуле (II.4) - для случая "в" .

5. Учет "перетекания".

Для расчета частных случаев системы произвольно расположенных скважин с заданными расходами в условиях "перетекания" рекомендуются следующие формулы /6/:

а. Для неограниченных пластов

$$S = \frac{1}{2\pi k m} \sum_{i=1}^{n} Q_{ci} \cdot K_0\left(r_i \sqrt{\xi}\right) , \qquad (У.12)$$

где r_i - расстояние от i -ой скважины до расчетной точки, а остальные обозначения те же, что и в формуле (1У.3);

б. Для пластов, ограниченных прямолинейным контуром:

$$S = \frac{1}{4\pi k m} \sum_{i=1}^{n} Q_{ci} \left[K_0\left(r_i \sqrt{\xi}\right) \pm K_0\left(\rho_i \sqrt{\xi}\right)\right] , \qquad (У.13)$$

где знак (+) берется в случае непроницаемого контура, знак (-) в случае контура с постоянным напором, ρ_i - расстояние от расчетной точки до зеркального отображения i -ой скважины относительно контура.

в. Формулы (У.12) и (У.13) справедливы при предположении, что уровень в водоносном горизонте, из которого идет "подпитывание", не меняется в процессе перетекания, что допустимо при относительно большой проводимости его

(гл.1У, § 1, п.Б).

§ 2. Расчеты установившейся фильтрации в сложных условиях

А. Общий метод расчета

1. Для скважин с заданным расходом следует предварительно определить функции понижения для каждой скважины или для характерных участков контура (§ 1 п.3), для чего используется моделирование. Затем расчет ведется аналогично § 1.

2. Для скважин с заданным понижением проще определять параметры потока непосредственно на модели.

Б. Упрощенный метод расчета для контурных и линейных систем скважин

1. Расчет ведется по выделенным лентам тока (гл.П § 1), для построения которых 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.П § 2), осуществляется по соответствующим формулам для бесконечных рядов скважин в полосообразном пласте, приведенным ниже. После такого расчета по формулам (Ш.1) или (Ш.2) 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.

Важно подчеркнуть, что если карьер является контуром дренажа, то первоначальные уровни (h_0 или h_{0c}) определяются (расчетом или на модели) заранее, исходя из дренажного эффекта самого карьера (гл.1У, § 1).

Пример расчета приведен в приложении № 3.

Ниже (п.п.2 и 3) приводятся основные формулы для расчета прямолинейных рядов скважин в полосообразном пласте, которые используются при расчетах в пределах ленты тока.

2. Несовершенный незатопленный котлован /10/:

а. Расчет участка линейной водопонизительной установки (рис.26а) ведется в следующей последовательности:

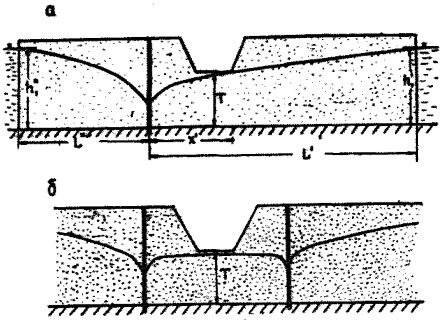


Рис.26. Схемы к расчету линейных систем скважин вблизи совершенных котлованов.

1) определяется требуемый уровень на линии контура $h_ф$, исходя из необходимого понижения по площади котлована; для этого используется формула:

$$\frac{T^2 - h_ф^2}{x'} = \frac{h_1'^2 - h_ф^2}{L'}; \qquad (У.14)$$

2) определяется дебит скважины:

$$Q_c = \frac{k\delta}{2}\left(\frac{h_1'^2 - h_ф^2}{L'} + \frac{h_1''^2 - h_ф^2}{L''}\right). \qquad (У.15)$$

Если задаваться расходом скважины, то из формулы (У.15) определяется требуемое расстояние между ними;

3) исходя из значений $h_ф$ и Q_c, можно определить уровень в скважине по формуле (Ш.1); если $h_c > 0$, то необходимо либо уменьшить расстояние между скважинами, либо проводить понижение контурной системой скважин;

4) расчет уровней в пределах ленты производится по

формуле:

$$h_x^2 = h_1^2 - \left(h_1^2 - h_\phi^2\right)\left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad . \qquad (У.16)$$

б. В случае, если скважины располагаются с обеих сторон котлована (рис.26б), величина h_ϕ принимается соответствующей отметке дна котлована в пределах ленты (T). Для расчета дебита в этом случае употребляется формула:

$$Q_c = \frac{k\delta}{2} \quad \frac{h_1^2 - T^2}{L} \quad , \qquad (У.17)$$

а для расчета уровней вне контура – формула (У.16) при $h_\phi = T$ (внутри контура уровни соответствуют величине h_ϕ).

Если $h_c < 0$ (h_c получаем из (III.1) при $h_\phi = T$), то следует либо уменьшить расстояние между скважинами, либо проводить водопонижение двухконтурной системой (например, ряд водопонижающих скважин в сочетании с рядом иглофильтров).

в. В случае, если понижение осуществляется двухрядной контурной установкой (рис.27), расчет производится по формулам /10/:

$$Q_c' = \frac{k}{2} \quad \frac{h_1^2 - h_c^2 - (h_1^2 - T^2)\frac{l_1}{l_1 + l_2}}{\frac{l_1 l_2}{\delta'(l_1 + l_2)} + 0{,}367 \lg \frac{\delta'}{2\pi r_c'}} \qquad (У.18)$$

и

$$Q_c'' = \frac{k}{2} \quad \frac{h_1^2 - T^2}{l_1 + l_2}\delta'' - Q_c' \left(\frac{l_1}{l_1 + l_2} - \frac{\delta''}{\delta'}\right), \qquad (У.19)$$

где индексы I и II относятся, соответственно, к внешнему и внутреннему контурам.

Расчет уровня в скважинах производится по формуле:

$$h_c''^2 = T^2 - \frac{Q_c''}{\pi k} \ln \frac{\delta''}{2\pi r_c''} \qquad (У.20)$$

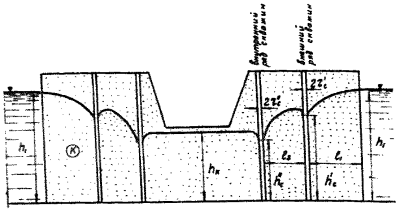


Рис.27. Схема к расчету двухрядной установки скважин, расположенных по обеим сторонам несовершенного котлована.

3. Совершенный котлован x).

а. Расчет однорядной контурной установки (рис.28) проводится по формуле /10/:

$$Q_c = \frac{k}{2} \times \frac{\left[\frac{l_2}{L}\left(h_1^2 - h_2^2\right) + h_2^2 - h_c^2\right]}{\frac{l_1 l_2}{6L} + 0{,}367 lg \frac{6}{2\pi r_c}} \quad (У.21)$$

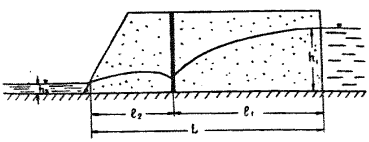


Рис. 28. Схема к расчету контурной установки скважин вблизи совершенного котлована.

Удельный расход потока, выходящего на откос, определяется формулой /10/:

$$q_0 = k\frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} - Q_c\frac{l_1}{6L} \quad (У.22)$$

Расчет ведется в следующем порядке:

1) задаваясь различными величинами 6, определяем Q_c по формулам (У.21) и строим график $Q_c = f(6)$;

2) с графика $Q_c = f(6)$ снимается несколько парных значений величин Q_c и 6_1, после чего строится график зависимости $q_0 = f_1(6)$, где q_0 вычисляется по формуле (У.22);

3) исходя из допустимых с точки зрения фильтрационных деформаций значений q_0 или из принятого коэффициента заслона (см.гл.1 § 5), пользуясь графиком

x) Сюда же относится случай несовершенного затопленного котлована.

$q_0 = f_1(\delta)$, находим требуемую величину δ, а затем по графику $Q_c = f(\delta)$ подбираем соответствующее значение Q_c.

б. В случае двухрядной схемы (рис.29) обычно заданными являются: δ'' и h_c'' для внутреннего ряда: Q_c' и h_c' для внешнего ряда. Следует определить Q_c'' и δ' по формулам /10/:

$$\delta' = 2 \cdot \frac{Q_c'}{k} \cdot \frac{l_1}{L} \; \frac{l_2 + l_3 - A\,l_1}{h_1^2 \cdot \frac{l_2}{L}(1+A) + h_c''^2\left(1 - A\frac{l_2}{l_3}\right) - h_c'^2 - \frac{2Q_c'}{k}\Phi_K'} \qquad (У.23)$$

$$Q_c'' = \frac{0{,}5\,k\left(h_1^2 - h_c''^2\,\frac{L}{l_3}\right) - \frac{Q_c'}{\delta'}\,l_1}{l_3}\,A\,\delta', \qquad (У.24)$$

где $A = \dfrac{l_3}{l_1 + l_2 + \delta''\,\dfrac{L}{l_3}\,\Phi_K''}$,

$$\Phi_K' = 0{,}367\,lg\,\frac{\delta'}{2\pi r_c'}, \quad \Phi_K'' = 0{,}367\,lg\,\frac{\delta''}{2\pi r_c''} \qquad (см.рис.7)$$

Удельный расход потока, выходящего на откос, вычисляется по формуле /10/:

$$q_0 = \frac{k\,h_1^2}{2L} - \frac{Q_c''}{\delta''} \cdot \frac{l_1 + l_2}{L} - \frac{Q_c'}{\delta'} \cdot \frac{l_1}{L} \qquad (У.25)$$

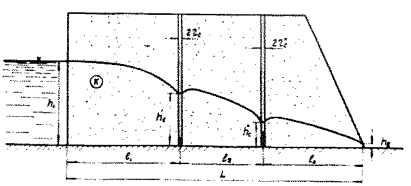


Рис. 29. Схема к расчету двухрядной установки скважин вблизи котлована.

Расчет ведется подбором, исходя из допустимого значения q_0. Формулы (У.23)-(У-25) могут быть использованы и при других заданных исходных параметрах.

4. Расчет уровней во всех случаях проводится в соответствии с гл.III § 1.

5. Для расчета большого числа взаимодействующих рядов скважин целесообразно привлекать метод фильтра-

ционных сопротивлений (гл.III, § 1). Расчет ведется в следующей последовательности /30/:

а) линии скважин заменяются эквивалентными траншеями с уровнями на них $h_ф$ (см.формулу (III.1)) и погонным притоком $q = \frac{Q_c}{\delta}$;

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 (III.1) образуют систему, из которой могут быть найдены все необходимые элементы потока: если заданы дебиты и расстановка скважин, то по балансовым уравнениям находятся величины уровней на линиях скважин ($h_{фi}$), а затем по формуле (III.1) определяются уровни в скважинах h_{ci}; если заданы уровни в скважинах и их расстановка, то из системы сначала исключаются неизвестные величины уровней на линиях скважин ($h_{фi}$), а затем – определяются неизвестные расходы скважин Q_{ci}.

6. Наиболее просто расчет контурных систем проводится подбором на модели.

§ 3. Расчет неустановившейся фильтрации в типовых условиях [x]

А. Скважины с постоянным расходом [xx]

1. Одиночная скважина.

Основной является формула /10/:

---

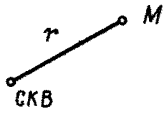
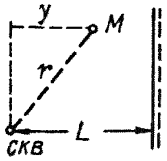
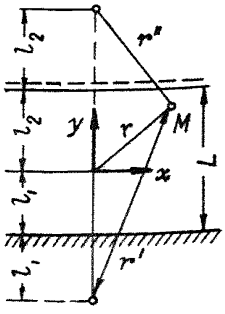
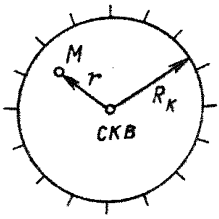
x) Для скважин с заданным понижением в настоящем параграфе приводятся решения лишь для простейших из типовых схем.

xx) Здесь же рассмотрен случай линейно изменяющегося расхода.

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2Q_c}{k} f_{ct}, \qquad (У,26)$$

где f_{ct} – функция понижения при неустановившемся режиме (см. табл.7) /10/.

Таблица 7.

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Выражение для f_{ct}
1. Скважина в неограниченном пласте		$f_{ct} = -\frac{1}{4\pi} E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$
2. Скважина у прямолинейного контура питания (стока)		при $\frac{L^2}{4at} > 0{,}5$ $f_{ct} = \frac{1}{4\pi}\left[E_i\left(-\frac{4L^2 - 4Ly + r^2}{4at}\right) - E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)\right]$
3. Скважина в полосообразном пласте с одним контуром питания (стока) и одним непроницаемым контуром.		при $\frac{L^2}{4at} \geqslant 4$ $f_{ct} = \frac{1}{4\pi}\left\{E_i\left[-\frac{(r'')^2}{4at}\right] - E_i\left[\frac{(r')^2}{4at}\right] - E_i\left[-\frac{r^2}{4at}\right]\right\}$ при $4 > \frac{L^2}{4at} > 0{,}1$ $f_{ct} = f_c = -2\sin\frac{\pi l_2}{2L}\sin\frac{\pi(l_2 - y)}{2L} F^*\left(\frac{x}{2L}; \frac{4L^2}{at}\right) - \frac{2}{3}\sin\frac{3\pi l_2}{2L}\sin\frac{3\pi(l_2 - y)}{2L} F^*\left(\frac{3x}{2L}; \frac{4L^2}{9at}\right)$; ($f_c$ – см. табл. 6, F^* – см. рис. 30)
4. Скважина в пласте с круговым непроницаемым контуром		$f_{ct} = \frac{1}{2\pi}\left(2\frac{at}{R_K^2} + \ln\frac{R_K}{r} - 0{,}75 + 0{,}5\frac{r^2}{R_K^2}\right)$

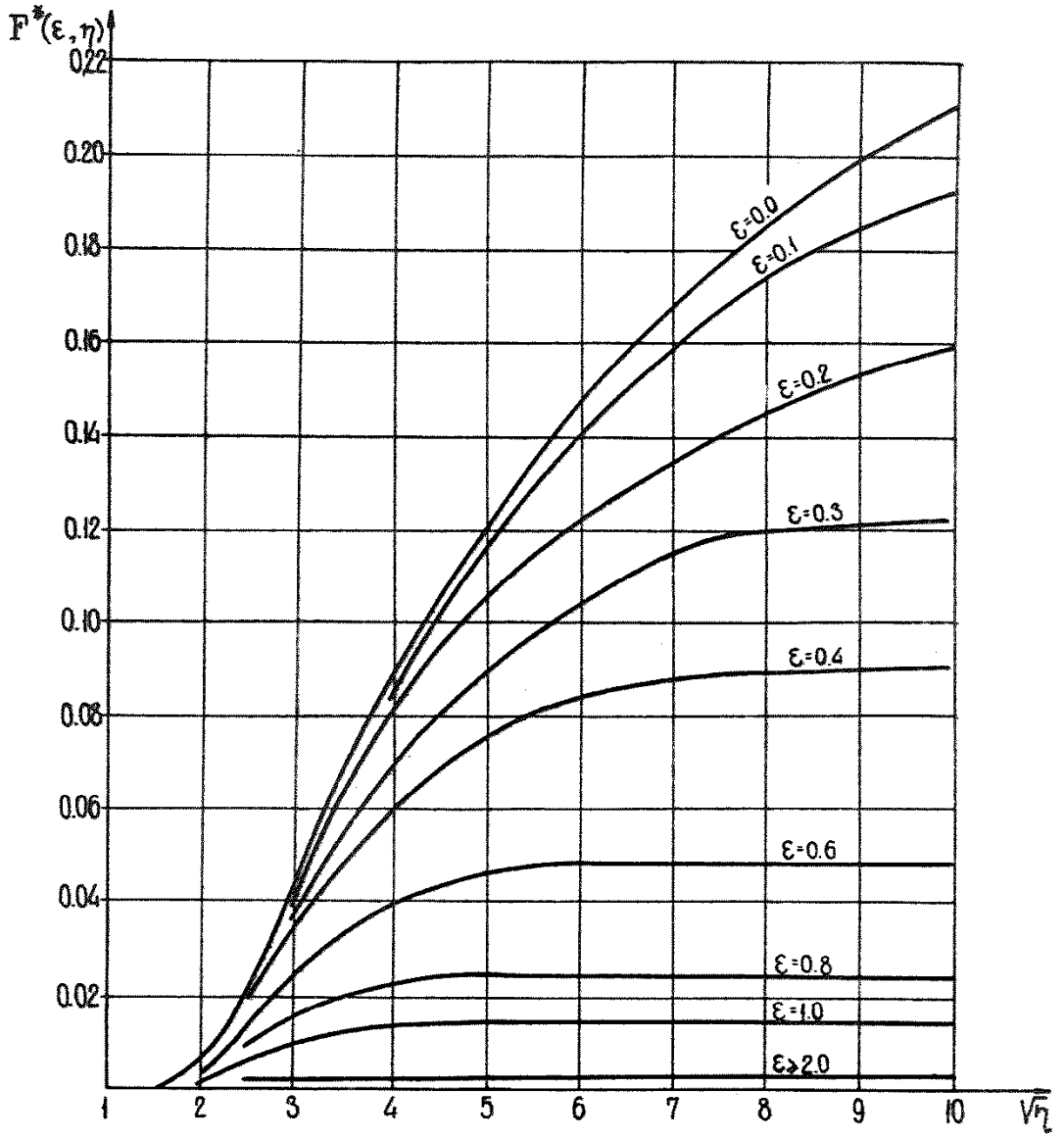


Рис.30. График функции $F^{*}(\varepsilon,\eta)$.

Значения интегральной экспоненциальной функции $E_i(-x)$ определяются по табл.8.

Таблица 8

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	-0,560	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	-0,043
0,12	-1,660	0,70	-0,374	2,5	-0,025
0,14	-1,524	0,75	-0,340	3,0	-0,013
0,16	-1,409	0,80	-0,311	3,5	-0,007
0,18	-1,310	0,85	-0,284	4,0	-0,004
0,20	-1,225	0,90	-0,260	4,5	-0,002
0,23	-1,110	0,95	-0,239	5,0	-0,001
0,26	-1,014	1,00	-0,219		

При $\frac{L^2}{4at} < 0,5$ - для схемы 2, и при $\frac{L^2}{4at} < 0,1$ - для схемы 3 - режим может считаться установившимся /10/.

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

2. Расчет группы отдельно стоящих скважин производится по формуле /10/:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2}{k} \sum_{i=1}^{n} Q_{ci} f_{cti} , \qquad (У.27)$$

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

3. Расчет водопонизительных контуров, приведенных к "большим колодцам".

а. Расчет может производиться по формуле (У.26) при замене Q_c на общий расход установки $Q_{уст}$, определяемый по формуле:

$$Q_{уст} = \frac{k\left[h_0^2 - h_2^2(t)\right]}{2 f_{кt}}, \qquad (У.28)$$

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

$$f_{кt} = -\frac{1}{4\pi}\left[E_i\left(-\frac{r_к^2}{4at}\right) - E_i\left(-\frac{R^2}{4at}\right)\right], \qquad (У.29)$$

где R – находится по табл.1.

б. Приведением к "большому" колодцу можно пользоваться (при выполнении условий применимости формулы (II.4):

1) для расчета уровней в центре колодца;

2) для расчета уровней в любой точке, расположенной внутри колодца, – при $\frac{at}{r_к^2} > 3{,}5$;

3) для расчета уровней в точках, расположенных вне колодца и удовлетворяющих условию $\frac{r}{r_к} > 1{,}5$, –при $\frac{at}{r_к^2} > 5$.

в. Приток $Q_{уст}$ складывается из притока изнутри ($Q_{вн}$) и притока извне $Q_{нр}$; их соотношение описывается формулой /6/:

$$\frac{Q_{вн}}{Q_{нр}} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{r_к^2}{2at}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{r_к^2}{2at}\right)} \qquad (У.30)$$

При $\frac{at}{r_к^2} > 3{,}5$ можно считать $Q_{уст} = Q_{нр}$

4. Расчет линейного ряда скважин

а. Расчет проводится по формуле /10/:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2Q_{уст}}{k} f_{kt} \,, \qquad (У.31)$$

где $$f_{kt} = \frac{l_1}{2B} F\left(\frac{\Delta_0}{l_1}; \lambda\right) + \frac{l_2}{2B} F\left(\frac{\Delta_0}{l_2}; \lambda\right) + 0{,}08 Ei\left(-\frac{R^2}{4at}\right); \qquad (У.32)$$

B – длина ряда, Δ_0 – длина перпендикуляра, опущенного из расчетной точки на линию ряда или на ее продолжение, l_1 и l_2 – расстояния от концов ряда до основания перпендикуляра, R – расчетное расстояние от точки в середине ряда до области питания (определяется по табл.1),

$$\lambda = \frac{B}{2at}; \quad \lambda_1 = \frac{l_1}{B} \lambda^{*)}; \quad \lambda_2 = \frac{l_2}{B} \lambda .$$

Значения функции $F(\bar{\Delta}_0, \lambda)$ определяются по графику (рис.31);

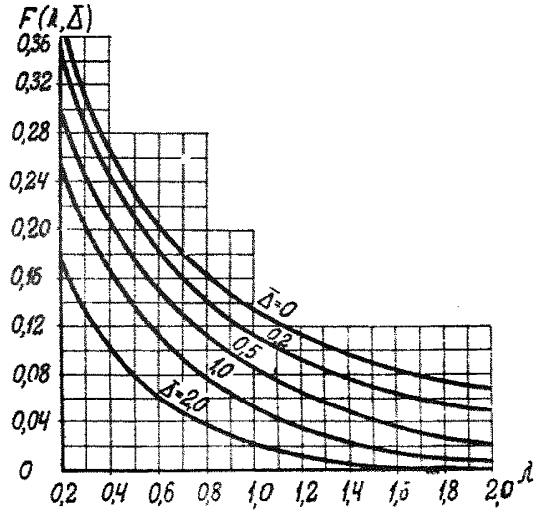


Рис.31. График функции $F(\lambda; \bar{\Delta})$.

б. При $\lambda \leqslant 0{,}5$ величину f_{kt} можно определять по формуле (У.29), заменяя $r_к$ на $r_{эф}$ ($r_{эф}$ определяется по рис.25).

в. При $\frac{R^2}{4at} \leqslant 0{,}1$ движение можно считать установившимся.

г. Поверочный расчет на максимальное понижение в скважинах ряда должен проводиться для центральной скважины по формуле (У.31), при за-

---

х) Если основание перпендикуляра Δ_0 попадает на продолжение линии ряда, то λ_1 следует брать со знаком минус (–).

мене величины $f_{\kappa t}$ на величину $f_{\kappa t}+\frac{1}{n}\Phi_к$ ($\Phi_к$ определяется по графику – рис.7, n – число скважин ряда) и при $\Delta_0 = r_c$.

Пример расчета приведен в приложении № 4.

5. Расчет водопонизительных контуров сложной формы осуществляется суммированием понижений, вызванных работой отдельных участков контура, определяемых из формулы (У.31).

6. Расчет группы скважин, расположенных равномерно по некоторой площади, может проводиться по формуле (У.28) после приведения к "большому колодцу". Этот прием допустим для расчета понижений в точках, удовлетворяющих условию $\frac{r}{r_к} > 1{,}5\text{-}2$, а также для расчета понижений во внутренних точках осушаемой площади, если определять суммарную функцию понижения $f_{\kappa t}$ по графику (рис.32) /63/.

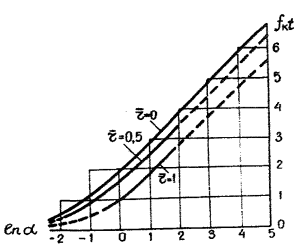


Рис.32. График функции $f_{\kappa t}$.

$$\alpha = \frac{at}{r_к^2}; \quad \bar{r} = \frac{r}{r_к}.$$

7. Учет неодновременности введения в работу скважин и изменения дебита скважин.

Для определения функции понижения $f_{t\,сум}$ от работы n скважин, включаемых в разное время и меняющих свой дебит по заданному ступенчатому графику (рис.33),

$$f_{t_{сум}} = \sum_{i=1}^{n} f_{cti} = \ln \frac{2.25\,a\,t_{ср}}{\rho_s^2}, \qquad (У.33)$$

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

$$\rho_s = r_s \left(\frac{r_1}{r_s}\right)^{r_1} \cdot \left(\frac{r_2}{r_s}\right)^{r_2} \ldots\ldots \left(\frac{r_n}{r_s}\right)^{r_n},$$

$i = 1, 2 \ldots\ldots n$ – номера скважин,

$r_к$ – расстояние от данной точки (где определяется по-

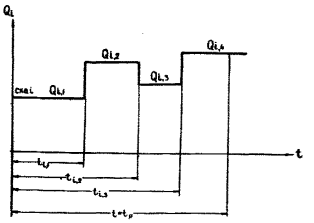


Рис.33. График изменения дебита i -ой скважины.

нижение) до i -ой скважины, t_{ij} - время окончания j -го этапа работы i -ой скважины (время отсчитывается от начала работы первой скважины); $Q_{i,j}$ - расход i -ой скважины на j -ом этапе,

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

$Q_{сум}$ - суммарный расход скважин в момент t_p, $\gamma_i = \frac{Q_i, t_p}{Q_{сум}}$

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 расчетный момент t_p.

Б. Скважины с постоянным понижением.

1. Одиночные скважины

а. Для условий неограниченного пласта расчет ведется по формулам (1У.9) и (1У.10).

б. Для пласта, ограниченного прямолинейным контуром питания, расчет ведется по формуле (1У.17).

в. Для пласта, ограниченного круговым контуром, расчет ведется по формуле (1У.9), причем

$$R(t) = r_к + (R_к - r_к)\,\bar{R}_1(\tau) \qquad (У.34)$$

- для контура с постоянным напором /28/ и

$$R(t) = r_к + (R_к - r_к)\,\bar{R}_2(\tau) \qquad (У.35)$$

– для непроницаемого контура /28/.

Величины $\bar{R}_1(\tau)$ и $\bar{R}_2(\tau)$ определяются по графикам рис.34, $R_к$ – радиус пласта.

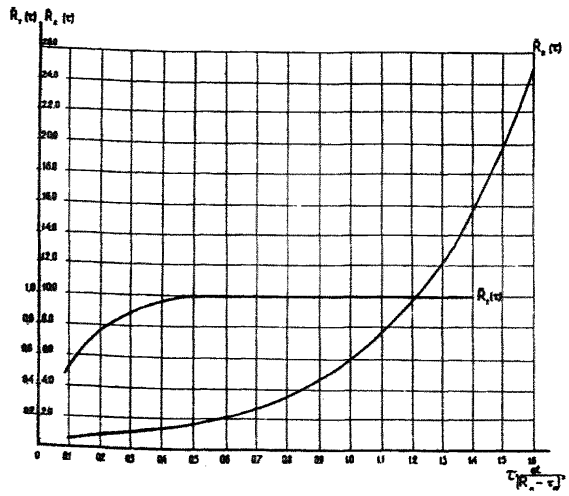


Рис.34.

2. Скважины, расположенные по квадратной сетке.

Расчет может проводиться по формулам (1У.9) и (У.35) после приведения квадратов к равновеликому кругу.

3. Ряды равноудаленных скважин.

а. Для ряда скважин в неограниченном пласте формулы имеют вид /30/:

$$Q_c = \frac{k(h_0^2 - h_c^2)}{2\Phi_к + \frac{R_р}{\delta}}, \quad (У.36)$$

где $\Phi_к$ находится по графику – рис.7, а $R_р$ – по графику – рис.35.

$$h = \sqrt{h_0^2 - (h_0^2 - h_c^2)\frac{R_р - x}{R_р + 2\delta\Phi_к}}, \quad (У.37)$$

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

Формулы (У.36) и (У.37) применимы лишь при $t < \frac{1}{4}\frac{B^2}{\pi a}$, где B – длина ряда.

б. Для двух параллельных рядов скважин в неограниченном пласте, находящихся на расстоянии $2L$ друг от друга /30/:

$$Q_c = \frac{k\left[(h_0 - S_ф)^2 - h_c^2\right]}{2\Phi_к}, \quad (У.38)$$

где S_φ – среднее понижение на линии ряда, определяемое по графику (рис.36).

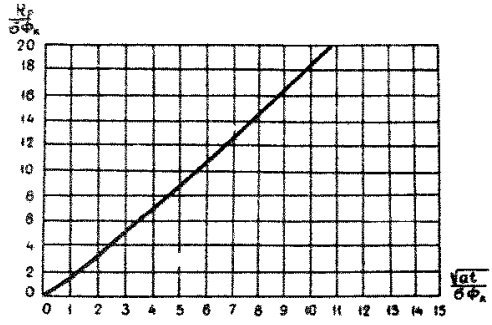


Рис.35. График для определения функции R_β

Понижение S_K по линии, проходящей посередине между рядами, определяется по графику – рис.36.

Формулой (У.38) и графиком (рис.36) следует пользоваться при

$$\frac{1}{4}\frac{B^2}{\pi a} > t > t_0 = \alpha^2 \frac{\sigma^2 \Phi_K^2}{a},$$

где α определяется из табл.9,

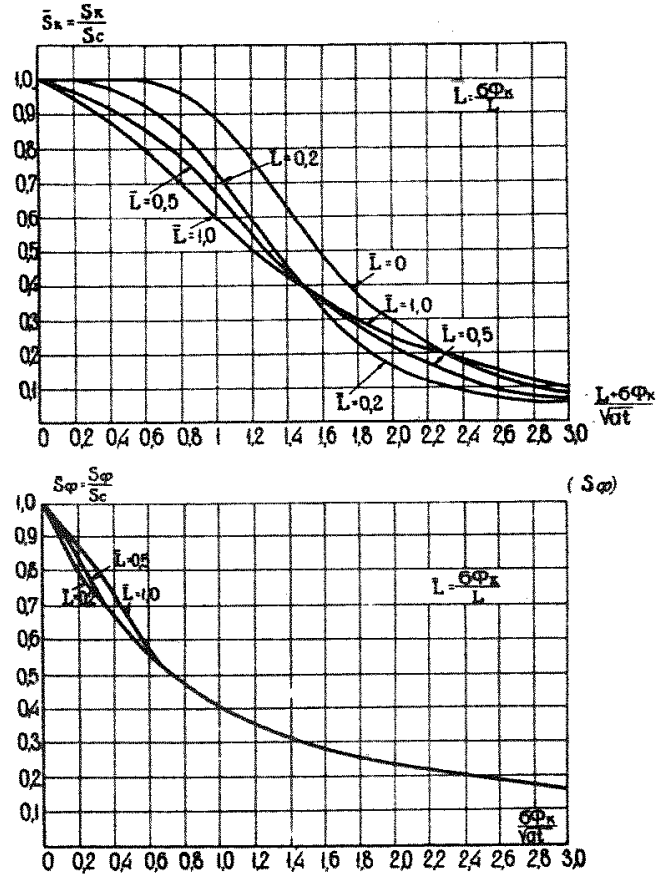


Рис.36.

а – График для расчета понижения уровней на оси симметрии (посредине между рядами) (S_K).
б – График для расчета относительного понижения среднего уровня на линии скважин (S_φ).

Таблица 9

$L/\sigma\Phi_K$	2	4	6	8	10
α	1,3	2,5	3,5	4,6	5,7

(при $\frac{L}{\sigma \Phi_K} > 10$ $\alpha = \frac{(L + 2\sigma\Phi_K)^2}{4a}$)

При $t < t_0$ справедливы формулы (У.36) и (У.37).

в. Для ряда скважин в полосообразном пласте с постоянными уровнями на границах:

$$Q_c = k\sigma\left(\frac{h_1^2 - h_\Phi^2}{t_1} + \frac{h_2^2 - h_\Phi^2}{t_2}\right), \qquad (У.39)$$

где средняя глубина по линии ряда h_Φ определяется из формулы:

$$h_\Phi^2 = h_0^2 - \frac{h_0^2 - h_c^2}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{t_2}\right)\sigma\Phi_K + 1}; \qquad (У.40)$$

h_0 – первоначальная глубина по линии скважин;
t_2 – расстояние до ближайшей границы пласта;
R_1 – определяется по графику – рис.37 ($\bar{R}_1 = \frac{R_1}{t_2}$; $\sigma = \frac{t_2}{\sigma\Phi_K}$)

4. Группы отдельно стоящих скважин в неограниченных пластах могут приближенно рассчитываться по формулам (1У.1) при подстановке в них величин радиуса влияния, определенных по формуле (II.6).

5. Приближенные расчеты для скважин, расположенных по некоторому контуру, можно проводить после выделения характерных лент тока (гл.II § 1) по формулам установившегося движения (§ 1 п.Б), подставляя в них "неустановившийся радиус влияния", определяемый по формуле (П.6).

6. В прочих случаях, а также для уточнения результатов расчетов, описанных в п.п 4 и 5 , следует прибегать к моделированию.

В. Учет наличия питания по площади

1. Дополнительная инфильтрация при расчетах скважин с заданным расходом может приближенно учитываться путем замены очага инфильтрации фиктивной скважиной с расхо-

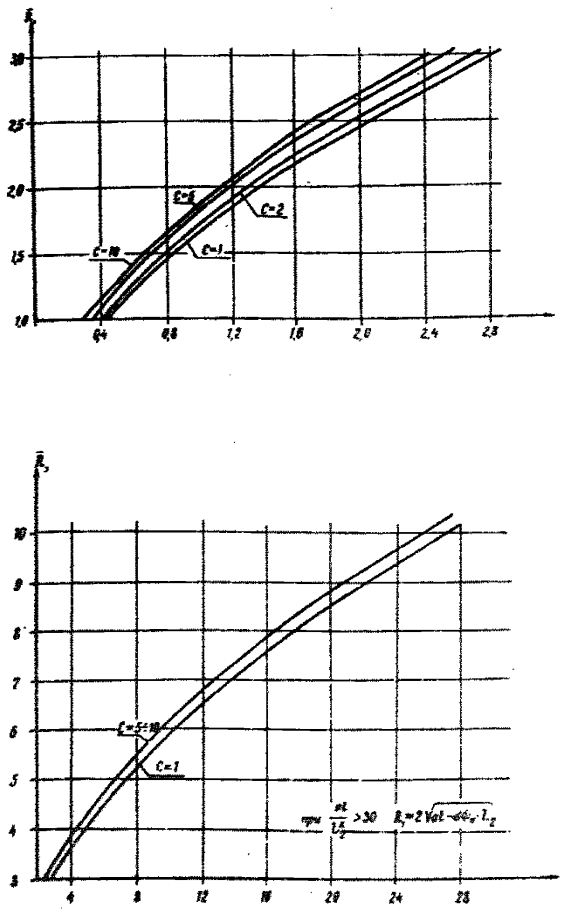


Рис.37. График для определения величины R_1.

дом, равным $Q=\omega F$ (где F – площадь очага инфильтрации); для случаев линейной и полосовой инфильтрации лучше вводить фиктивный ряд скважин.[x)]

2. Расчет круговой установки скважин с постоянным расходом в неограниченном напорном пласте при наличии перетекания.

Если "подпитка" идет за счет водообильного горизонта, уровни которого практически не зависят от "перетекания", то дебит группы скважин Q_y определяется зависимостью /10/:

$$Q_y = \frac{k m S_к}{f_к^n}, \qquad (У.41)$$

где $S_к$ – требуемое понижение в центре установки; $f_к^n$ – функция понижения для пласта с наличием "перетекания", определяемая по графику рис.38 в зависимости от $\frac{r}{b}$ $\left(b=\sqrt{\frac{k m m_б}{k_б}}\right)$; индекс " б " относится к "водоупору") и величины

$$\alpha_n = \frac{b^2}{4at} \quad \left(f_к^n = f^n \text{ при } r = r_к \right).$$

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

$$S_c = \frac{Q_y}{km} \cdot f_c^n, \qquad (У.42)$$

x) В этом случае ошибка в величине понижения оказывается малой уже на расстоянии от полосы инфильтрации, равном удвоенной ее ширине.

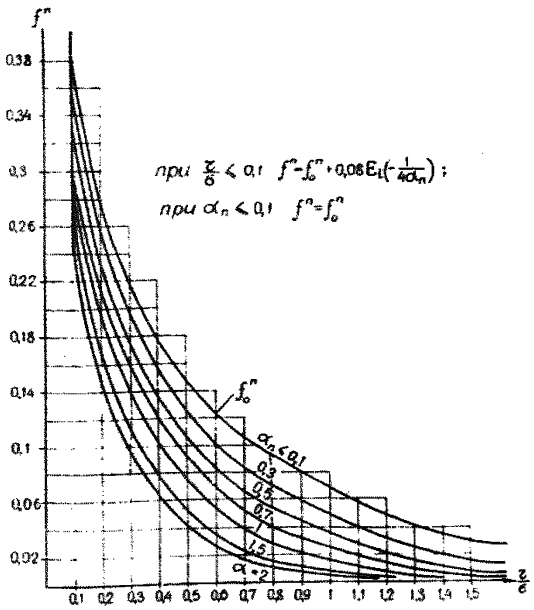


Рис.38. График функции $f^n(\frac{r}{b}, \alpha_n)$.

где f_c^n находится по графику рис.38 при $r = r_{oc}$. Величина r_{oc} (среднее расстояние от расчетной скважины до других скважин) определяется по формуле (II.10). Должно быть выполнено условие:

$$S_c \leq h_{co}$$

3. В прочих (даже типовых) случаях расчет требует привлечения моделирования.

§ 4. Расчет неустановившейся фильтрации в сложных условиях x)

А. Скважины с постоянным расходом

1. Приближенный расчет одиночной скважины проводится по формуле (У.26), причем величина f_{ct} определяется формулой /30/:

$$f_{ct} = \frac{1}{4\pi\nu}\left[E_i(-\frac{R^2}{4at}) - E_i(-\frac{r^2}{4at})\right], \qquad (У.43)$$

где r – расстояние от скважины до расчетной точки;
R – расчетное расстояние до областей питания, которое можно найти из формулы:

$$R = re^{2\pi\nu f_c} \qquad (У.44)$$

---

x) Излагаемая методика рекомендуется и для тех случаев расчета скважин с постоянным понижением в типовых условиях, которые не охвачены решениями, приведенными в § 3.

Величина f_c в формуле (У.44) является функцией понижения для условий установившейся фильтрации (определяется на модели ЭГДА).

2. Приближенный расчет группы отдельно стоящих скважин проводится по формуле (У.27), где величины f_{cti} определяются по формуле (У.43).

3. Контурные системы рассчитываются по формуле:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2Q_c}{k} n (f_{ct} - \Delta f) \quad , \qquad (У.45)$$

где n – число скважин ряда;

f_{ct} – функции понижения для средней скважины ряда (определяется по формуле (У.43);

Δf – величина, определяемая формулой (У.7).

Методика определения величины $r_{эф}$, входящей в выражение Δf, для малых значений времени отличается от случая установившегося движения (§ 1 п.3): вместо длины ряда подставляется длина "активной зоны", а остальная часть ряда считается бездействующей. "Активная зона" захватывает отрезок ряда, заключенный в интервале $\pm 2\sqrt{at}$ (начало 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 $б$.

4. Расчет контуров сложной формы может проводиться по формуле:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2Q_c}{k} \sum_{i=1}^{p} [n (f_{ct} - \Delta f)]_i \quad , \qquad (У.46)$$

где индекс " i " относится к отдельным участкам контура,

p – число таких участков.

5. Расчет линейного ряда скважин в условиях наклонного напорного пласта, с учетом его "истощения" (рис.38).

Расчет понижения на линии скважин производится по формуле /8/:

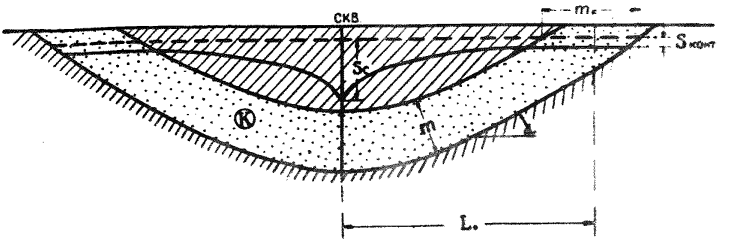


Рис.39. Ряд скважин в условиях мульдообразного пласта.

$$S_ф = \frac{Q_c}{\sigma}\left[\frac{L_0}{2km} + \frac{(t-t_0)(1-\gamma)}{\mu^* L_0 (2-\gamma)\frac{1-2\gamma}{1-\gamma} + 2\mu^* m_к}\right], \qquad (У.47)$$

где L_0 – расстояние от выхода пласта на поверхность до его средней точки (рис.39);

$$\gamma = \frac{Q_c}{2\sigma km tg\alpha}; \quad \mu^* = \frac{km}{a^*}; \quad t_0 = \frac{L_0^2}{\pi a^*};$$

$m_к$ – ширина горизонтального сечения пласта на его контуре;

$S_ф$ – среднее понижение на линии ряда;

α – угол наклона пласта.

Понижение в скважине определяется по формуле:

$$S_c = S_ф + \frac{Q_c}{2\pi km} \ln\frac{\sigma}{\pi d_c}. \qquad (У.48)$$

Как всегда, должно выполняться соотношение $(h_{oc}-S_c)>0$. Понижение на границе определяется формулой:

$$S_{конт.} = \frac{S_ф - Q_c\frac{L_0}{2\sigma km}}{1-\gamma}. \qquad (У.49)$$

6. Во всех прочих случаях расчет ведется на модели.

Б. Скважины с постоянным понижением.

1. Контурные системы скважин могут приближенно рассчитываться по выделенным лентам тока (§ 3 п.Б5).

2. В прочих случаях, а также для более точного расчета контурных систем, следует ориентироваться на моделирование.

Г Л А В А У1

РАСЧЕТЫ ДРУГИХ ВИДОВ ДРЕНАЖНЫХ УСТРОЙСТВ

§ 1. Р а с ч е т г о р и з о н т а л ь н ы х о т к р ы т ы х и з а к р ы т ы х д р е н (к а н а в, т р а н ш е й и т.п.)

А. В общем случае расчет проводится аналогично открытым горным выработкам (гл.1У)

Б. Параллельные взаимодействующие дрены.

1. Установившееся движение подземных вод.

а. Расстояние между совершенными дренами (например, дренами под внутренними отвалами (рис.40), определяется по формуле /14/:

$$\sigma = 2\sqrt{\frac{k}{\omega}\left(h_{max}^2 - h_2^2\right)}, \qquad (У1.1)$$

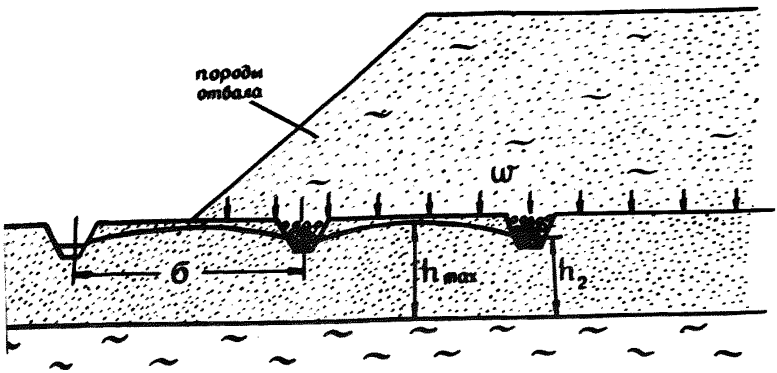


Рис.40. Схема к расчету систематического дренажа отвалов.

где ω – интенсивность просачивания атмосферных вод (устанавливается опытным путем); для приближенных расчетов ω = 0,001 – 0,002 м/сутки – в легких суглинках и супесях; ω = 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".

Удельный приток воды к каждой дрене равен:

$$q = \omega б . \qquad (У1.2)$$

б. Расстояние между несовершенными канавами определяется из формулы (1У.1) при подстановке вместо вели-

чины h_2 величины $h_{2ф}$, определяемой по формуле (Ш.11) при $q_ф = \omega б$.

в. Для расчета параллельных дрен с различными отметками уровней рекомендуется следующий порядок расчета /30/:

1) несовершенные дрены заменяются совершенными с уровнями в них $h_{2ф}$ ($H_{2ф}$), определяемыми в соответствии с (Ш.11) или (Ш.12);

2) составляются выражения (в алгебраическом виде) для расхода потока, считая дрены совершенными, с уровнями, равными $h_{2ф}(H_{2ф})$;

3) из полученной системы уравнений исключаются неизвестные величины $h_{2ф}$ ($H_{2ф}$).

Пример расчета приведен в приложении № 5.

2. Неустановившееся движение подземных вод при отсутствии питания по площади.

а. Система параллельных совершенных дрен, вводимых в работу одновременно.

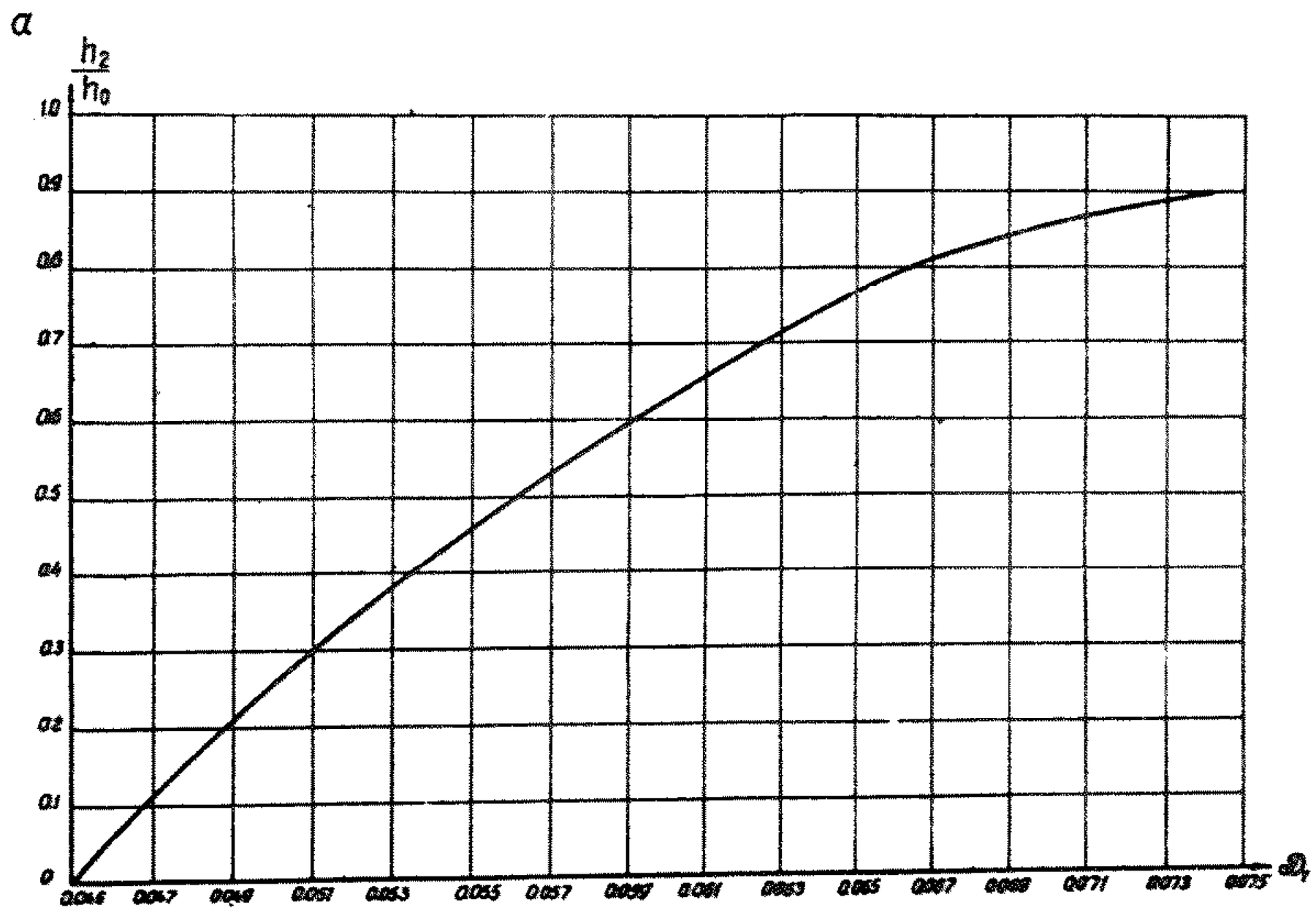
Время снижения уровня водоносного горизонта до величины h_t подсчитывается по зависимости /25/:

$$t = \frac{D_1 + D_2}{4} \cdot \frac{\mu б^2}{k h_0}, \qquad (У1.3)$$

где D_1 D_2 – безразмерные коэффициенты, которые определяются по графикам (рис.41) в зависимости от отношения

$$\frac{h_t}{h_0} \text{ и } \frac{h_2}{h_0};$$

h_t – уровень воды посредине между дренами на момент времени t ;


а
$\frac{h_2}{h_0}$
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0.046
0.047
0.049
0.051
0.053
0.055
0.057
0.059
0.061
0.063
0.065
0.067
0.069
0.071
0.073
0.075
Q_1

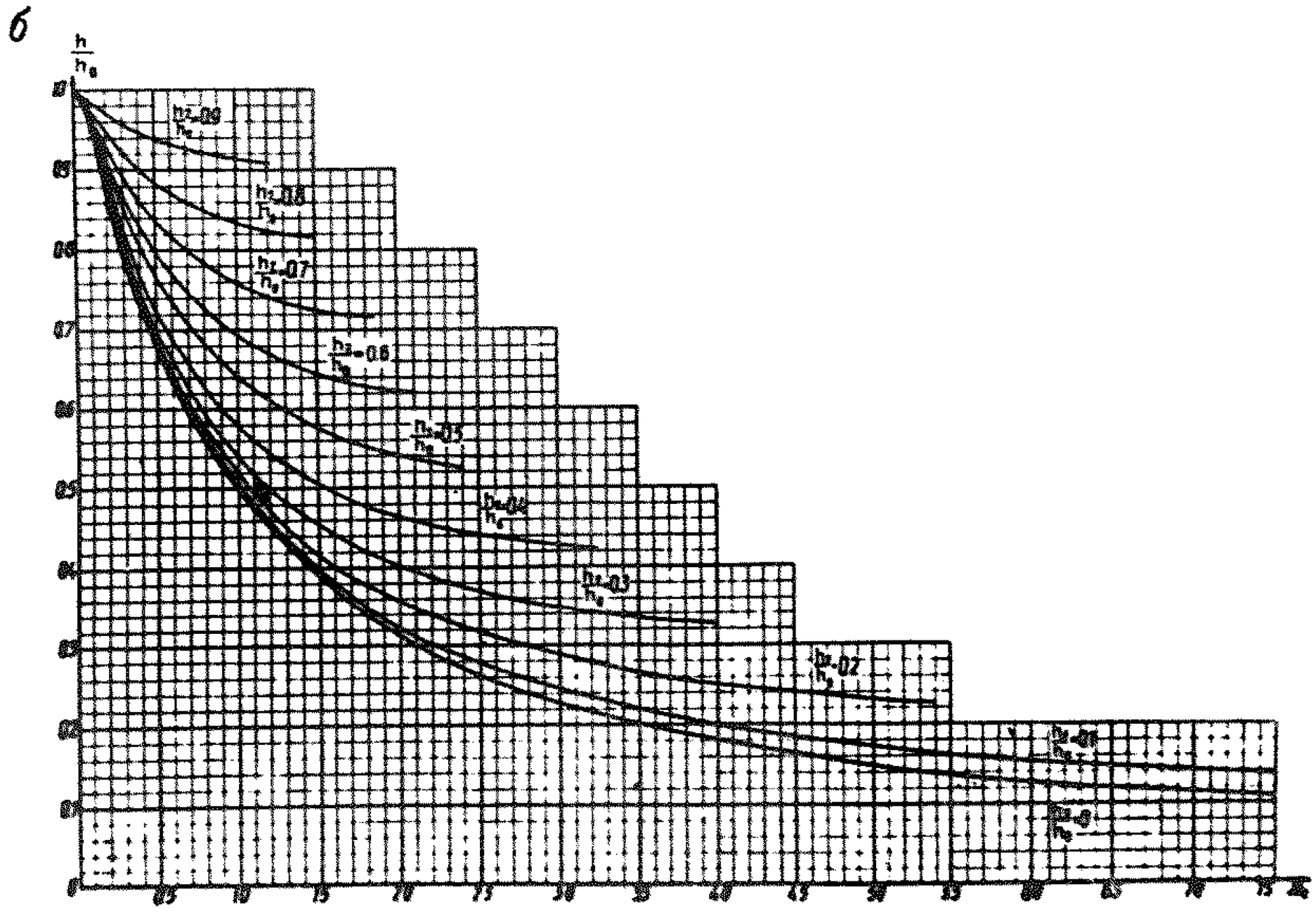

б
$\frac{h}{h_0}$
$\frac{h_2}{h_0}$=0.9
$\frac{h_2}{h_0}$=0.8
$\frac{h_2}{h_0}$=0.7
$\frac{h_2}{h_0}$=0.6
$\frac{h_2}{h_0}$=0.5
$\frac{h_2}{h_0}$=0.4
$\frac{h_2}{h_0}$=0.3
$\frac{h_2}{h_0}$=0.2
$\frac{h_2}{h_0}$=0.1
$\frac{h_2}{h_0}$=0

Рис.41.

h_2 – глубина воды в дрене (считая от водоупора);

h_0 – начальная глубина потока.

Если задано время осушения до некоторого уровня h_t, то из формулы /У1.3/ можно определить расстояние между дренами.

Удельный односторонний приток в дрену подсчитывается по формуле

$$q = \frac{2k(h_1^2 - h_2^2)}{\sigma} . \qquad (У1.4)$$

б. Система параллельных совершенных дрен, вводимых в работу последовательно.

Если можно считать, что к моменту включения второй дрены фильтрация к первой дрене является установившейся, то расчет ведется по графику (рис.42) /17/.

Аналогично может рассчитываться процесс истощения водоносного пласта на участке между бортом карьера и параллельной ему дренажной траншеей.

в. Учет несовершенства дрен в условиях, отвечающих п.п. а и б, проводится путем фиктивного увеличения расстояния между дренами на величину:

$$\Delta L = 2{,}92\, h_2 \lg \frac{h_2}{\pi r_{оф}} . \qquad (У1.5)$$

Здесь обозначения те же, что и в формуле (Щ.11).

3. Расчет горизонтальных дрен в прочих случаях целесообразно осуществлять методами моделирования.

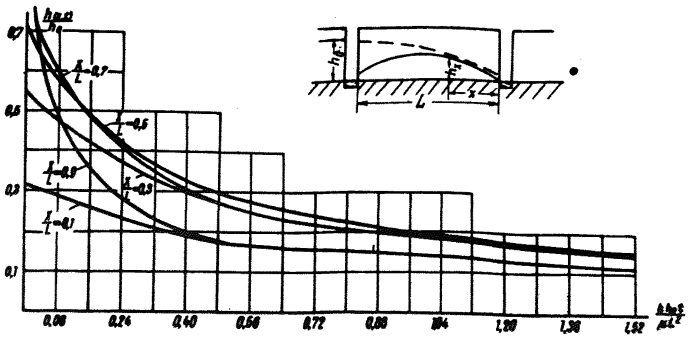


Рис.42.

§ 2. Расчет дренажных штреков

1. Если над дренажным штреком отсутствует нависание (высота штрека больше величины участка высачивания, определенной по формуле (Ш.18), то расчет осуществляется аналогично открытым горизонтальным дренам (§ 1).

При расположении штреков по прямоугольной сетке скорость истощения пласта описывается графиком, изображенным на рис.43 /17/.

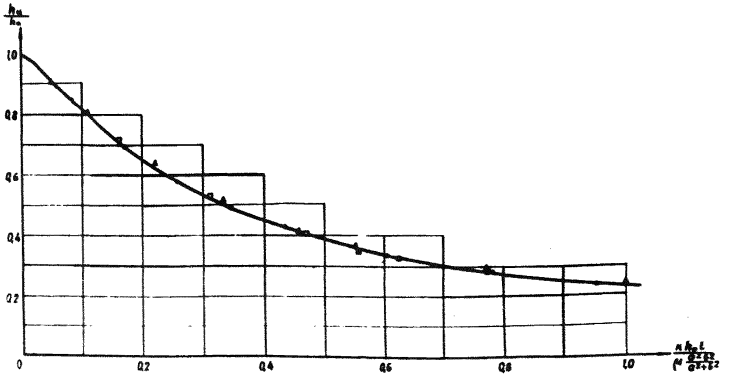


Рис.43. График функции $h_ц(t)$.

a, b - параметры сетки штреков, h_0 и $h_ц$ - первоначальная и сниженная глубины в центральной точке.

2. Если имеется "нависание", то расчетная схема должна быть изменена. Это относится, главным образом, к случаям, когда штрек проходится в слое, проницаемость которого меньше, чем у перекрывающего слоя (рис.44).

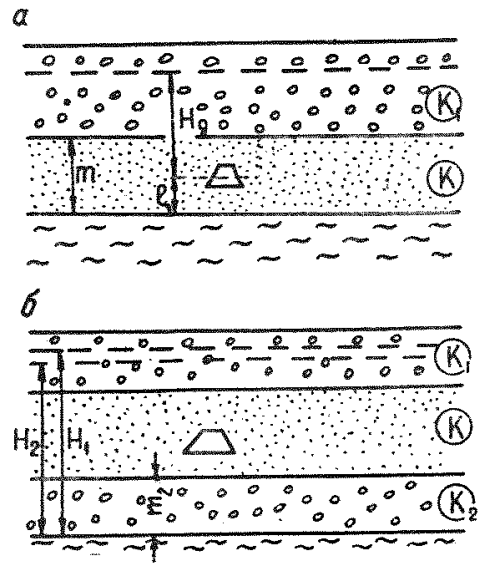


Рис.44.Схемы к расчету притоков к дренажному штреку.

а. При выполнении соотношения $\frac{k_1}{k_2} > 20-30$ штрек практически не оказывает дренажного эффекта на верхний горизонт; приток к штреку можно рассчитать по формулам /3/:

$$q=\frac{kH_A}{0{,}37\lg\left[\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{8}\cdot\frac{4l_1-d}{m}\right)\operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{8}\cdot\frac{d}{m}\right)\right]} \quad (У1.6)$$

$(l_1 = l - m)$

- для случая, изображенного на рис.44а;

$$q=k\frac{(H_1-H_2)\frac{l}{m}+H_2-l-m_2}{0{,}37\lg\left[\frac{4}{\pi}\cdot\frac{m}{d}\cos\frac{\pi(2l-m)}{2m}\right]} \quad (У1.7)$$

- для случая, изображенного на рис.44б;

(d - приведенный диаметр штрека).

б. При $\frac{k_1}{k} < 20-30$ рекомендуется использовать моделирование. Для приближенных расчетов можно вводить осредненный коэффициент фильтрации согласно гл. II § 5.

§ 3. Расчет горизонтальных скважин [x]

1. Расчет системы параллельных взаимодействующих горизонтальных скважин, закладываемых нормально к линии простирания откоса карьера (рис.45) непосредственно над водоупорным ложем /8/.

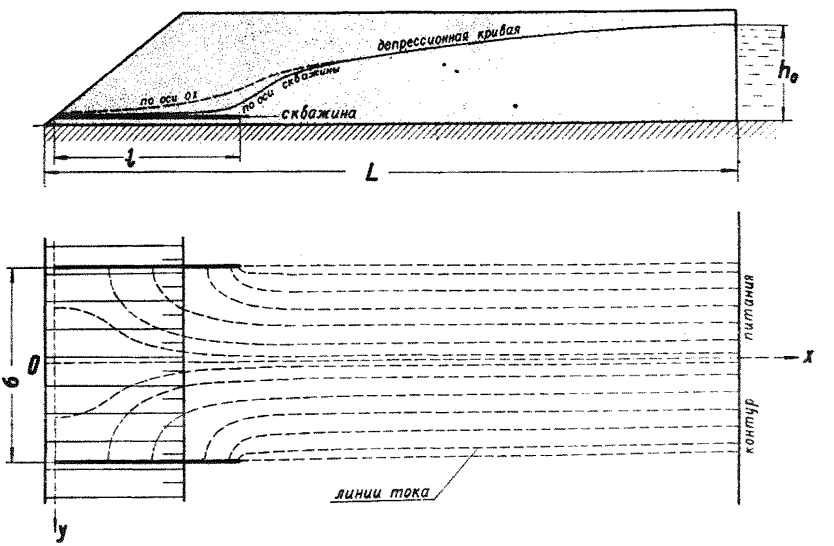


Рис.45. Схема к расчету горизонтальных дренажных скважин.

а. Дебит горизонтальных скважин Q_c определяется по зависимости:

---

x) По приводимым формулам могут рассчитываться и наклонные скважины, пройденные под углами менее 15° к горизонту /20/.

$$Q_c = Q_{бН}\left(1 - \frac{2}{\pi}\arcsin\frac{1}{ch\frac{\pi l}{б}}\right) = Q_{бН} f\left(\frac{l}{б}\right), \qquad (У1.8)$$

где l – длина скважины;

$Q_{бН}$ – внешний приток к участку борта карьера шириной $б$, определяемый по формуле:

$$Q_{бН} = \frac{q_0 б}{1 - \frac{б}{L} f_1\left(\frac{l}{б}\right)}; \qquad (У1.9)$$

q_0 – расход, поступающий к откосу при отсутствии скважин;

L – расстояние от карьера до области питания ($L > l + б$);

$\delta = f\left(\frac{l}{б}\right)$ – определяется по графику (рис.46), а

$f_1\left(\frac{l}{б}\right)$ – функция, вычисляемая по табл.10.

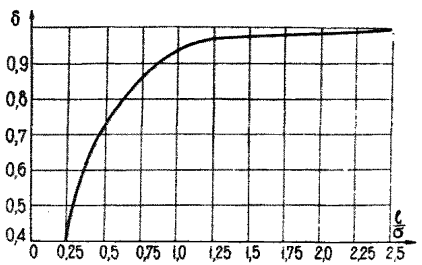


Рис.46. График для определения расхода горизонтальных скважин.

Обозначения: q – приток на 1 пог.м откоса при отсутствии скважин; l – длина скважин; $б$ – расстояние между ними.

$\frac{l}{б}$	$f_1\left(\frac{l}{б}\right)$
0,25	0,08
0,50	0,29
1,0	0,78
1,5	1,29
2,0	1,78
2,5	2,28

б. Расход потока Q_0, высачивающегося на откос карьера в интервале $(-y_0; +y_0)$) (рис.45), равен:

$$Q_0 = 2\frac{Q_{бН}}{\pi}\arcsin\frac{sh\frac{\pi y_0}{б}}{ch\frac{\pi l}{б}}, \qquad (У1.10)$$

где $sh(z)$ и $ch(z)$ – обозначения гиперболических функций /32/. В частности, удельный расход высачивания в средней точке между скважинами определяется формулой:

$$q_{уд.} = q_0 \frac{1}{ch \frac{\pi l}{6}} \quad . \qquad (У1.10\text{-а})$$

в. Глубина потока по линии, проходящей посредине между скважинами, определяется из выражения

$$h_x = \sqrt{\frac{2 Q_{бн}}{\pi k} \operatorname{arc\,sh} \frac{sh \frac{\pi x}{6}}{ch \frac{\pi l}{6}}} \quad . \qquad (У1.11)$$

2. Для скважин, проходимых под углом к линии простирания борта, ориентировочный расчет можно также вести по приведенным выше формулам.

3. Приведенное решение с некоторым приближением распространяется и на случай неустановившейся фильтрации: для этого достаточно подставить в него вместо L величину $R = \sqrt{\pi a t}$ (при $R < L$)x) , где t – время от момента вскрытия водоносного горизонта бортом карьера.

4. Можно рекомендовать следующий порядок расчета горизонтальных скважин, проходимых на нерабочем борту карьера:

а) определяется приток к откосу q_0 при отсутствии горизонтальных скважин на несколько моментов времени, – согласно рекомендациям гл.1У;

б) определяется степень общей устойчивости откосов нерабочего борта с учетом возможного снижения гидростатических и гидродинамических сил посредством горизонтальных скважин и без такого учета, для чего можно использовать рекомендации, содержащиеся в разд.1;

в) при значительном расхождении полученных углов откоса целесообразно использовать горизонтальные скважины

---

x) Для движения, отличного от плоскопараллельного, должно предварительно осуществляться приведение величины R (см.гл.П, § 2).

большой длины, с тем, чтобы максимально снизить уровень вод в пределах "призмы возможного оползания"; в противном случае скважины предназначаются лишь для ограничения фильтрационных деформаций, так что длина их может определяться только по техническим соображениям;

г) расстояние между скважинами целесообразно принимать равным (0,5–1,0) l ;

д) по формуле (У1.9) определяется приток Q_{bH} ; в тех случаях, когда расчет притоков q_0 ведется по выделенным лентам тока, в формулу (У1.9) следует вводить величины "приведенных" расстояний (см.гл.II, § 2);

е) по формуле (У1.10–а) определяется максимально возможный удельный приток к откосу, пропущенный между скважинами ($q_{уд.}$);

ж) полученные значения $q_{уд.}$ сравниваются с критическими притоками (см.разд.II, гл.II, § 1); если "проскок" недопустимо велик, то следует либо дополнительно предусмотреть горизонтальный прибортовой дренаж, либо уменьшить первоначально выбранное расстояние между скважинами;

з) по формуле (У1.8) определяется приток к одной скважине Q_c ;

и) по известным формулам гидравлики проверяется пропускная способность скважины при выбранном ее диаметре и максимальном расходе, равном Q_c ;

к) по формуле (У1.11) определяются ориентировочные величины уровней вблизи скважин.

5. Расчет горизонтальных скважин, пройденных из общего ствола ("лучевые водозаборы"), можно проводить по формулам, выведенным для вертикальных скважин, если вместо r_c ввести в них величину /5/:

$$r_b = \frac{l}{\chi} \,, \qquad (У1.12)$$

где l – длина лучей, а χ – величина, определяемая в зависимости от числа лучей по следующей таблице:

Таблица 11

Число лучей	1	2	3	4
Значение χ	4,00	2,00	1,86	1,78

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

§ 4. Расчет вакуумных скважин и иглофильтров

1. Для вакуумных скважин можно рекомендовать вести расчет по формулам для скважин с заданным понижением (гл.У), увеличивая величину понижения на величину вакуума h_{bk}. В частности, для случая, когда вакуумная установка расположена вблизи откоса совершенного котлована, справедлива формула /10/:

$$Q_c^b = Q_c\left(1 + \frac{h_{bk}}{S'}\right), \qquad (У1.13).$$

где Q_c – расход скважины без вакуума, работающей при понижении S'.

2. Расчет иглофильтров.

а. Расчет притоков к иглофильтровым установкам производится аналогично расчету водопонижающих скважин с заданным понижением (гл.У), отсчитываемым от первоначального уровня на месте заложения иглофильтров.

б. Величина понижения S_H определяется формулой /21/:

$$S_H = h_{bk} - h_n - h_r, \qquad (У1.14)$$

где h_n – превышение оси насоса относительно несниженного уровня, h_r – гидравлические потери (около 1,5–2,5 м).

в. Для контурных иглофильтровых установок, расположенных вблизи промежутка высачивания, с достаточной степенью точности можно обычно считать, что приток к линии иглофильтровых установок на каждый момент времени (t_p) равен расчетному притоку к карьеру на тот же момент времени (t_p). Определив, таким образом, удельный приток к линии иглофильтров, расчет расходов иглофильтровой установки можно провести для каждого момента (t_p) по формулам установившегося движения.

г. Ввиду близкого расположения иглофильтров друг от друга, при расчетах необходимо учитывать несовершенство дренажного контура (формулы III.7–III.9).

ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ Ш

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. Госстройиздат, 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 д о в М.И. – Осушение шахтных полей и карьеров, Госгортехиздат, 1961.

3. А р а в и н В.И., Н у м е р о в С.Н. – Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. Гостехиздат, 1953.

4. Б и н д е м а н Н.Н. – Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. Госгеолтехиздат, 1963

5. Б о р и с о в Ю.П., Т а б а к о в В.П. – Научно-тех.сборник по добыче нефти, № 16, 1962.

6. Б о ч е в е р Ф.М., Г а р м о н о в И.В., Л е б е д е в А.В., Ш е с т а к о в В.М. – Основы гидрогеологических расчетов. "Недра", 1965.

7. Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. Сб.1, Госстройиздат, 1952.

8. Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. Сб.3, Госстройиздат, 1959.

9. Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. Сб.4, Госстройиздат, 1962.

10. Воробков Л.Н. и др. - Водопонижение в гидротехническом строительстве, Госстройиздат, 1960.

11. Гиринский Н.К. - К теории фильтрации в подземные выработки, ДАН СССР, 75, № 3, 1947.

12. Жернов И.Е. - Расчеты захвата подземных вод, изд.АН УССР, 1954.

13. Ким В.Ю. - Об одном приближенном методе решения нестационарных задач теории фильтрации. ПМТФ, № 1, 1961.

14. Козлов В.С. - Расчеты дренажных сооружений. Стройиздат, 1940.

15. Маскет М. - Течение однородных жидкостей в пористой среде. Госстройиздат, 1949.

16. Мироненко В.А. - Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Ленинград, 1967.

17. Мироненко В.А., Норватов Ю.А., Бокий Л.Л. - О фильтрации в условиях истощения водоносных пластов. "Изв.ВУЗов, Геология и разведка", 1967, № 5.

18. Плотников Н.И., Сыроватко М.В., Щеготев Д.И. - Подземные воды рудных месторождений, Металлургиздат, 1957.

19. Полубаринова-Кочина П.Я. - Теория движения грунтовых вод, Гостехиздат, 1952.

20. Полубаринова-Кочина П.Я. - О наклонных и горизонтальных скважинах конечной длины . "Прикл.математика" т.XX, 1956.

21. Понижение уровня грунтовых вод ЛИУ и ЭИ (инструкция), Госстройиздат, М., 1958.

22. Справочное руководство гидрогеолога, Гостоптехиздат, 1959.

23. Труды лаборатории гидротехнических сооружений, Сб.3, Изд.ВОДГЕО, 1960.

24. Труды института ВОДГЕО, Госстройиздат, 1958.

25. Устинов С.А. Результаты моделирования действия горизонтальных совершенных дрен на гидроинтеграторе В.С. Лукьянова, Тр. коорд. совещаний по гидротехнике, вып. XXУ, "Энергия", 1966.

26. Фильтрационные расчеты осушения карьерных полей, изд.ВНИМИ, 1965.

27. Чарный И.А. - Подземная гидрогазодинамика, Гостоптехиздат, 1963.

28. Чекалюк Э.Б. - Метод условного контура пласта; Научно-техн.сб.по добыче нефти, № 17, 1962.

29. Шестаков В.М. - Методика определения участка высачивания, издание ВОДГЕО, 1955.

30. Шестаков В.М. - Теорические основы расчета подпора, водопонижения и дренажа, изд.МГУ, 1965.

31. Щелкачев В.Н. - Упругий режим пластовых водонапорных систем. Гостоптехиздат, 1948.

32. Янке Е., Эмде Ф. - Таблицы функций, Гостехиздат, 1948.

33. Hantush M. "Journ.Geoph.Res.", vol. 67, 1962.

34. Hantush M. "Journ. Hydraul.Div.", vol. 89, 1963, Nr 1.

Раздел IV

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

Условные обозначения

При изложении методических вопросов электромоделирования приняты буквенные обозначения, приведенные в разделе III; при рассмотрении вопросов, связанных с технической стороной моделирования, используются также следующие условные обозначения:

φ – потенциальная функция;
Φ – фильтрационное сопротивление;
R – электрическое сопротивление (в омах);
V – напряжение (в вольтах);
U – электрический потенциал;
$\mathfrak{I}$ – сила тока (в амперах);
$\rho_{\square}$ – сопротивление квадрата электропроводной бумаги (ом);
m_{Φ} – масштаб сопротивлений (размерность зависит от режима моделируемого фильтрационного потока и его вида);
m_{φ} – масштаб потенциальной функции;
m_q – масштаб расходов;
ρ – гидравлическое сопротивление трубок гидроинтегратора;
ω_i – емкость сосуда гидроинтегратора.

ГЛАВА 1

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

§ 1. Общие вопросы моделирования

1. Для реальных гидрогеологических условий проведение расчетов осушения с помощью одних лишь аналитических методов нередко оказывается невозможным или приводит к весьма громоздким и трудоемким операциям; в таких случаях необходимо обращаться к моделированию.

2. Моделирование фильтрации, в принципе, может осуществляться на моделях, изготовляемых из естественных или искусственных пористых материалов. Однако такое-физическое-моделирование, проводимое в фильтрационных лотках, по ряду соображений, мало пригодно для решения практических задач, так как при изготовлении модели большие затруднения вызывает получение необходимой проницаемости пористой среды, а также создание границ сложной конфигурации. Кроме того, часто бывает невозможно сохранить действительное соотношение между геометрическими размерами модели (например, между мощностью водоносного пласта и его плановыми размерами). Трудности технического порядка возникают и при замере параметров потока, так как различного рода датчики осложняют процесс изготовления модели, а иногда значительно искажают картину фильтрации. Наконец, при физическом моделировании в некоторых случаях необходимо учитывать, что гравитационные силы действуют в равной степени как на модель, так и на ее прототип, поэтому характеристики модели должны быть соответствующим образом изменены по сравнению с реальным их соотношением.

3. Аналоговое моделирование основано на формальном подобии явлений, связанных с двумя различными фи-

зическими системами. Аналогия между такими системами выражается в однозначном соответствии между отдельными их элементами, а также между функциями возмущения и реакциями на это возмущение в соответственных точках систем. Критерием подобия двух систем является формальная эквивалентность дифференциальных уравнений, выражающих сущность явлений, происходящих в рассматриваемых системах. Посредством аналогового моделирования могут быть произведены гидрогеологические расчеты для любых реальных условий - для областей сложной конфигурации, отличающихся фильтрационной неоднородностью в плане и в разрезе, с учетом локального или площадного питания за счет инфильтрации и перетекания, а также неустановившегося характера фильтрации. В частности, только аналоговое моделирование позволяет решать такие задачи, как определение притоков и уровней по отдельным участкам карьерного поля (например, вдоль контура карьера), расчет фильтрации к несовершенным выработкам в слоистых и неоднородных в плане и разрезе средах, расчет дренажных скважин в сложных условиях (в том числе - вблизи совершенного котлована) и т.д.

4. Аналоговое моделирование обычно осуществляется на моделях, создаваемых на основе гидравлических или электрогидродинамических аналогий. Метод гидравлических аналогий реализуется на гидравлическом интеграторе ИГЛ, представляющем собою сеточную гидравлическую модель, пригодную для решения задач установившейся и неустановившейся фильтрации /2/. Метод электрогидродинамических аналогий реализуется на электрических интеграторах разных типов: интегратор ЭГДА используется для моделирования на сплошных моделях из электропроводной бумаги; интеграторы типа ЭИ-12, МСМ и другие предназначены для моделирования на сеточных моделях из проволочных сопротивлений. В принципе большая часть этих интеграторов рассчитана на моделирование установившихся фильтрационных течений, однако при использовании дополнительных панелей с электрическими сопротивлениями они могут быть приспособлены также для решения задач неустановившейся фильтрации.

5. Поскольку в настоящее время наиболее широкое применение находят электроинтеграторы, в данной работе основной упор делается на методы электрогидродинамической аналогии. Принципы моделирования на гидроинтеграторах, по сути дела, те же, что и на сеточных электроинтеграторах. Поэтому в дальнейшем будут отмечаться лишь некоторые особенности техники моделирования на гидроинтеграторах.

6. Моделирование одномерных потоков целесообразно проводить на электрических сопротивлениях, соединенных в цепочки. Наиболее удобным материалом для моделирования двумерной установившейся фильтрации является электропроводная бумага /3/, /10/. При моделировании на бумаге легко создаются границы любого очертания, что весьма важно для учета реальных гидрогеологических условий. Бумага может применяться и для моделирования неустановившихся фильтрационных процессов. Однако, чаще всего для создания моделей двумерных полей при моделировании процессов неустановившейся фильтрации целесообразно применять электрические сопротивления, соединенные в виде сеток. При моделировании трехмерных задач установившейся фильтрации используются растворы и гели электролитов, требующие применения переменного электрического тока /3/. Моделирование на растворах и гелях является довольно сложным процессом, что ограничивает область применения этих материалов при решении практических задач. В целом, моделирование трехмерных задач проще осуществлять на сеточных моделях /4/.

7. Моделирование фильтрационных потоков проводится на основе соблюдения принципов подобия. Критерием формального подобия фильтрации в пористых средах и тех физических процессов, которые используются для воспроизведения фильтрации, является эквивалентность исходных дифференциальных уравнений. Параметры этих уравнений должны быть связаны между собой некоторыми коэффициентами, подстановка которых в уравнения обеспечивает тождественность последних.

§ 2. Обоснование расчетной модели и основные принципы электрогидродинамической аналогии

1. Расчетная модель определяется совокупностью данных, характеризующих область и процесс фильтрации подземных вод [x], т.е. гидрогеологическими условиями объекта, а также расположением, типом и режимом работы горных выработок и дренажных устройств.

2. Природная схема области фильтрации в сочетании с проектируемыми инженерными сооружениями может быть весьма сложной, поэтому при выборе расчетной модели необходима, в целях упрощения моделирования, дальнейшая ее схематизация. Наиболее эффективными путями упрощения расчетной модели – по сравнению с природной схемой – являются уменьшение "порядка мерности" и фрагментирование.

3. Уменьшение "порядка мерности", т.е. числа независимых координат значительно сокращает объем и время моделирования. Трехмерный и двумерный характер фильтрации чаще всего обусловлен несовершенством водоприемников, неоднородным строением области фильтрации и сложными очертаниями границ области фильтрации.

Несовершенные дрены могут быть заменены при моделировании совершенными на основе метода фильтрационных сопротивлений, способы применения которого при моделировании рассмотрены в гл.II и III. На основе этого же метода ряды скважин могут быть заменены эквивалентными совершенными траншеями.

Местные сопротивления, обусловленные резкой деформацией линий тока вблизи скважин или несовершенных дрен, могут определяться заранее – расчетами или на моделях. Введение в модель определенных таким образом сопротивлений позволяет свести двумерный поток к одномерному, а трехмер-

---

x) Исходные гидрогеологические данные для моделирования аналогичны таковым при проведении аналитических расчетов (разд.III).

ный – к двумерному или одномерному.

Области фильтрации неоднородного строения в ряде случаев могут быть заменены однородными – в соответствии с критериями, изложенными в § 5 гл.II разд.III.

4. Задача снижения "порядка мерности" потока обычно связана с фрагментированием. Выделенные фрагменты потока должны быть достаточно представительными, чтобы после проведения моделирования можно было оценить прогнозируемый фильтрационный процесс в его крайних положениях, т.е. в самом неблагоприятном и наиболее выгодном варианте, и чтобы результаты моделирования могли быть распространены на всю область с достаточной для практики точностью.

Выделенный фрагмент должен быть независимым в гидродинамическом отношении от остальной части фильтрационного поля. Поэтому фрагмент обычно выделяется по линиям тока и по линиям равных напоров фильтрационного потока. При моделировании сравнительно несложного в плане фильтрационного потока фрагменты могут быть выбраны на основании тщательного анализа гидрогеологической обстановки и на основании соображений симметрии; при этом плановая задача часто может быть сведена к плоскопараллельной или плоско-радиальной. В сложных условиях для выделения фрагментов рекомендуется проводить предварительное моделирование; оно обычно может быть осуществлено в стационарной постановке на нескольких моделях, конфигурация которых обусловлена изменением границ области при развитии фильтрационного процесса во времени. Анализ полученных при этом гидродинамических сеток позволяет выбрать характерные ленты тока для расчетных моделей.

5. В соответствии с законом Ома, течение электрического тока в проводнике подчиняется зависимости:

$$J = \frac{V_1 - V_2}{R} \quad . \qquad (1.1)$$

При моделировании удобнее замерять на электромоделях не абсолютную величину напряжения V_i, а относи-

тельную величину электрического потенциала U_i, равную:

$$U_i = \frac{V_i - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} . \qquad (1.2)$$

Величина $(V_{max} - V_{min})$ при моделировании является постоянной, равной напряжению на выходных клеммах интегратора. Величина электрического потенциала U_i соответствует величине напора или другой потенциальной функции (φ_i) фильтрационного потока (п.6), а величина R электрического сопротивления - величине фильтрационного сопротивления Ф (п7).

6. При моделировании могут использоваться 3 вида потенциальных функций.

а. В общем случае, потенциальная функция представляет собой величину пьезометрического напора ($\varphi = H$); соответствующие основные расчетные формулы имеют вид:

$$q = \frac{k\, m (\varphi_1 - \varphi_2) \Delta y}{\Delta x} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Phi} \qquad (1.3)$$

для напорной фильтрации;

$$q = \frac{k\, h_{cp} (\varphi_1 - \varphi_2) \Delta y}{\Delta x} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Phi} \qquad (1.4)$$

для безнапорной фильтрации;

где $\Delta x, \Delta y$ - соответственно, длина и ширина расчетного участка фильтрационного потока; h_{cp} - средняя глубина потока в пределах участка; Ф - фильтрационное сопротивление (п.7).

б. Для однородного безнапорного горизонта при горизонтальном водоупоре целесообразно принимать за потенциальную функцию величину $\varphi' = 0{,}5\, h^2$; соответствующая расчетная формула:

$$q = \frac{k (\varphi'_1 - \varphi'_2) \Delta y}{\Delta x} = \frac{\varphi'_1 - \varphi'_2}{\Phi'} \qquad (1.5)$$

в. Для горизонтально-слоистого безнапорного горизонта в качестве потенциальной функции можно принимать функцию Н.К.Гиринского (разд.III, гл.II, § 5): $\varphi''=\varphi_r$; расчетная формула будет иметь вид:

$$q=\frac{(\varphi_1''-\varphi_2'')\Delta y}{\Delta x}=\frac{\varphi_1''-\varphi_2''}{\Phi''} \qquad (1.6)$$

г. При моделировании двумерных профильных задач, а также трехмерных задач, в качестве потенциальной функции всегда принимается величина напора $H(h)$.

7. Любое поле фильтрации можно представить в виде совокупности прямоугольных участков, обладающих определенными фильтрационными сопротивлениями; в пределах каждого из этих участков фильтрация условно может рассматриваться, как плоскопараллельная. Выражения для фильтрационных сопротивлений таких участков зависят от вида потенциальной функции φ.

а. При потенциальной функции $\varphi=H$

$$\Phi=\frac{\Delta x}{k m \Delta y} \qquad (1.7)$$

– для напорной фильтрации в пределах участка длиной Δx и шириной Δy x);

$$\Phi=\frac{\Delta x}{k h_{cp}\Delta y} \qquad (1.7a)$$

– для безнапорной фильтрации (h_{cp} – средняя глубина потока между узловыми точками в фиксированный момент времени);

при моделировании двумерных профильных задач (т.е. когда составляется двумерная модель водоносного горизонта в вертикальном разрезе):

$$\Phi=\frac{\Delta x}{k \Delta Z} \qquad (1.8)$$

— для сопротивлений, отвечающих фильтрации в горизонтальном направлении (0X) и

x) При моделировании плоскопараллельной одномерной фильтрации $\Delta y = 1$.

$$\Phi = \frac{\Delta Z}{k \Delta x} - \qquad (1.8а)$$

– для сопротивлений, отвечающих движению вдоль оси 0Z .

б. При потенциальной функции $\varphi' = 0{,}5\, h^2$.

$$\Phi' = \frac{\Delta x}{k \Delta y}\ ; \qquad (1.9)$$

в. При потенциальной функции φ'' , отвечающей функции Гиринского,

$$\Phi'' = \frac{\Delta x}{\Delta y} \qquad (1.10)$$

г. При осесимметричной фильтрации область движения обычно разбивается на участки, ограниченные концентрическими окружностями; для этого случая фильтрационные сопротивления определяются по формулам:

$$\Phi_0 = \frac{1}{2\pi k m} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} - \qquad (1.11)$$

при напорной фильтрации, когда $\varphi = H$;

$$\Phi_0 = \frac{1}{2\pi k h_{ср}} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} - \qquad (1.12)$$

при безнапорной фильтрации, когда $\varphi = H$,

$$\Phi_0' = \frac{1}{2\pi k} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} - \qquad (1.13)$$

для безнапорной фильтрации, когда $\varphi' = 0{,}5\, h^2$,

$$\Phi_0'' = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} - \qquad (1,14)$$

для безнапорной фильтрации, когда $\varphi'' = \varphi_г$.

В формулах (1.11) – (1.14) r_i – расстояние от центра симметрии до середины i -ого кольцевого участка.

8. Понятие о фильтрационных сопротивлениях позволяет представить поле фильтрации (плановое или профильное) не только в виде сплошной геометрически подобной модели из электропроводного материала, но и в виде сетки омических сопротивлений. Отдельные участки поля между фиксированными точками, характеризующиеся определенной ве-

личиной фильтрационного сопротивления, моделируются соответствующими электрическими сопротивлениями, а все поле фильтрации моделируется сеткой таких сопротивлений, значения которых определяются в соответствии с выражениями (1.7) - (1.14).

9. Количественная связь между гидродинамическими элементами фильтрационного потока и соответствующими им элементами модели осуществляется с помощью масштабных соотношений:

$$\varphi = m_{\varphi}(U - U_{min}) + \varphi_{min}, \qquad (1.15)$$

$$\Phi = m_{\Phi} R, \qquad (1.16)$$

$$Q = m_q J, \qquad (1.17)$$

$$l_н = m_l \cdot l_м, \qquad (1.18)$$

где $l_н$ и $l_м$ - линейные размеры натуры и модели (только для бумажных и сплошных объемных моделей), а коэффициенты $m_{\varphi}, m_{\Phi}, m_q$ и m_l определяются по таблице 12.

§ 3. Принципы составления моделей

1. Плановые фильтрационные потоки в стационарной постановке обычно моделируются электропроводной бумагой.

а. Наиболее простым случаем для моделирования является однородное фильтрационное поле. Под однородным фильтрационным полем (в отличие от принятого термина "однородный водоносный горизонт") понимается такое поле, которое характеризуется величиной фильтрационного сопротивления, постоянной для всех геометрически подобных участков этого поля.

С этой точки зрения, однородными фильтрационными полями будут являться напорные водоносные пласты

Таблица I2

СВОДКА МАСШТАБНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИИ

Вид потенциальной функции		$\varphi = H$	$\varphi = 0{,}5\,h^2$	$\varphi = \varphi_r$
Выражение для масштаба потенциальной функции		$m_\varphi = \frac{H_{max} - H_{min}}{U_{max} - U_{min}}$, м	$m_\varphi = \frac{0{,}5(h^2_{max} - h^2_{min})}{U_{max} - U_{min}}$, $м^2$	$m_\varphi = \frac{\varphi_{max} - \varphi_{min}}{U_{max} - U_{min}}$, $\frac{м^3}{сут}$
Выражение для масштаба сопротивлений	для бумажных моделей	$m_\varphi = \frac{1}{km\rho_\square}$, $\frac{сутки}{м^2 \cdot ом}$ x)	$m_\varphi = \frac{1}{k\rho_\square}$, $\frac{сутки}{м \cdot ом}$	$m_\varphi = \frac{1}{\rho_\square}$, $\frac{I}{ом}$
	для сеточных моделей	Масштаб сопротивлений выбирается произвольно, в зависимости от величин имеющихся в наличии сопротивлений, но с учётом требования: $m_\varphi > \frac{J_{min}}{\bar{Q}}$		
Линейный масштаб для бумажных моделей		$m_l = \frac{x_н}{x_м} = \frac{y_н}{y_м}$, м/см	$m_l = \frac{x_н}{x_м} = \frac{y_н}{y_м}$, м/см	$m_l = \frac{x_н}{x_м} = \frac{y_н}{y_м}$, м/см
Масштаб расходов		$m_q = \frac{m_\varphi}{m_\varphi (V_{max} - V_{min})}$, $\frac{м^3}{сут.}$		

x) При моделировании профильных задач на бумажных моделях $m_\varphi = \frac{I}{k\rho_\square}$, сут/м.ом;

xx) J_{min} – минимальная сила тока, которая может быть замерена на приборе с необходимой точностью

$$\bar{Q} = \frac{Q_{min}}{m_\varphi}(V_{max} - V_{min});$$

Q_{min} – минимальная величина расхода, подлежащая определению при моделировании (оценивается заранее ориентировочным расчётом).

с одинаковой величиной проводимости по всей площади их развития, а также безнапорные горизонты при горизонтальном водоупоре и однородном или горизонтально-слоистом их строении (при задании соответствующих потенциальных функций). Характер изменения потенциальных функций в этих случаях зависит только от граничных условий. Для соблюдения соответствия между однородным фильтрационным полем и его моделью необходимо и достаточно, чтобы бумажная модель повторяла в выбранном геометрическом масштабе конфигурацию фильтрационного поля.

Критерием для выбора масштабов являются: для линейного масштаба - удобные для моделирования размеры модели, для масштаба сопротивлений - наличие электропроводной бумаги различного сопротивления.

б. Если фильтрационное поле - неоднородное, то выделяется несколько однородных участков, которые рассматриваются, как отдельные однородные поля; выделенные участки модели изготовляются из электропроводной бумаги и соединяются электропроводным клеем.

При этом должно выполняться соотношение:

$$\frac{\rho_{oi}}{\rho_{on}} = \frac{(k\,m)_n}{(k\,m)_i} - \qquad (1.19)$$

- при потенциальной функции $\varphi = H$

$$\frac{\rho_{oi}}{\rho_{on}} = \frac{k_n}{k_i} - \qquad (1.19\text{-а})$$

- при потенциальной функции $\varphi' = 0{,}5\,H^2$,

где ρ_{on} и ρ_{oi} - электрическое сопротивление квадрата электропроводной бумаги, моделирующей, соответственно, зону n или i .

2. При замене сплошного поля дискретными сопротивлениями (сеточная модель) фильтрационное поле разбивается на ряд элементарных площадей ($\Delta x \cdot \Delta y$) по сетке, совпадающей с направлениями выбранных координатных осей. Наиболее удобной является квадратная

сетка ($\Delta x=\Delta y$), так как при такой разбивке фильтрационные сопротивления между центрами квадратных элементарных площадей будут одинаковы по двум взаимно перпендикулярным направлениям. В принципе, возможна разбивка поля и на прямоугольные участки, обладающие в каждом из взаимно перпендикулярных направлений определенными фильтрационными сопротивлениями, которые моделируются отдельными электрическими сопротивлениями.

Одномерный фильтрационный поток моделируется цепочкой сопротивлений, а двумерное поле фильтрации - сеткой омических сопротивлений, соответствующих в масштабе фильтрационным сопротивлениям натуры. Неоднородность поля учитывается в изменении сопротивлений отдельных участков сетки пропорционально изменению величин фильтрационных сопротивлений соответствующих участков фильтрационного поля, при сохранении одинакового по всему полю шага сетки (рис.47).

В сеточных моделях непрерывная область фильтрации моделируется дискретно, поэтому линейный масштаб не имеет места; масштабные соотношения при моделировании на сетках приведены в табл.12.

3. Изготовление модели производится согласно следующим принципам.

а. Сплошные модели из электропроводной бумаги изготовляются в соответствии с принятым линейным масштабом и масштабом сопротивлений, при этом конфигурация границ поля фильтрации учитывается автоматически: геометрическая форма модели подобна форме фильтрационного поля.

б. Сеточная модель собирается из сопротивлений, выбранных, исходя из масштаба сопротивлений; трудности в воспроизведении границ, ориентировка которых не совпадает с направлением координатных осей разбивки (в особенности при сложных криволинейных очертаниях границ) могут быть устранены путем замены криволинейного контура ступенчатой линией; при этом размеры ступеней определяются шагом сетки, по которой разбивается фильтрационное поле вблизи границы.

в. При моделировании на сетках электрические сопротивления вдоль границ модели, соответствующих линиям тока фильтрационного поля (например, непроницаемая граница), должны в два раза превышать величину электрических сопротивлений, моделирующих внутренние части поля- при квадратной разбивке на элементарные площади (рис.47). При моделировании границ с постоянной величиной потенциальной функции вдоль них сопротивления вдоль соответствующих границ модели опускаются, а узловые точки соединяются проводниками.

г. Иногда при моделировании на сетках возникает необходимость рассматривать отдельные части поля с различной детальностью (например, области вблизи скважин), поэтому разные части поля делятся по "крупной" и "мелкой" сетке (рис.48). Полученные две сетки соединяются в узловых точках. Для уменьшения местных погрешностей на границе раздела двух сеток существует метод введения "полосы согласования" в виде определенным образом рассчитанных диагональных сопротивлений /4/. Однако, при увеличении шага крупной сетки до четырех раз (по сравнению с шагом мелкой сетки) возникающие при соединении области погрешности незначительны и построение "полосы согласования" необязательно.

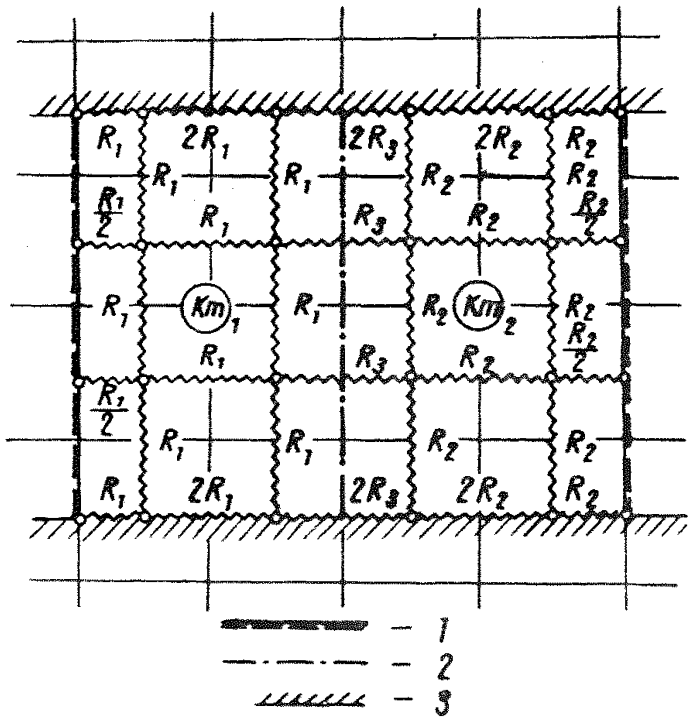
§ 4. Общий порядок моделирования и задание граничных условий

1. Моделирование обычно производится в следующем порядке:

а) на основе анализа расчетной схемы выбирается тип модели, на которой будут производиться исследования (§ 2), а затем устанавливаются масштабы моделирования (согласно табл.12 и § 3);

б) производятся необходимые подготовительные расчеты (§ 2) и изготовляется модель (§ 3);

в) задаются граничные условия на внешних границах и проверяется соответствие модели "бытовому" фильтра-



1 – граница с постоянным напором,
2 – граница раздела двух зон,
3 – непроницаемая граница.

$$R_2 = \frac{R_1 (Km)_1}{(Km)_2}; \quad R_3 = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

Рис.47. Схема к расчету модели неоднородного в плане пласта.

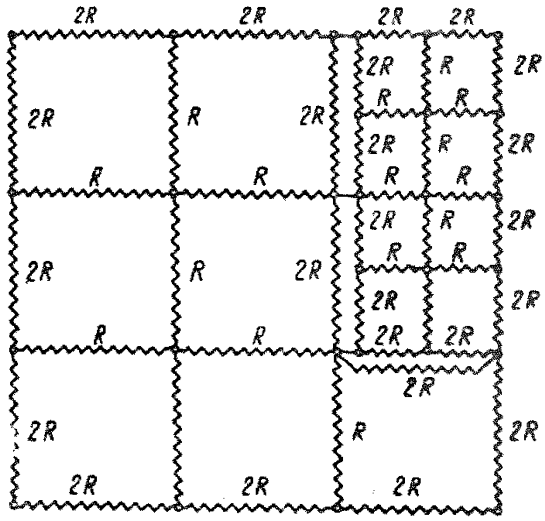


Рис.48. Разбивка поля фильтрации по крупной и мелкой сетке.

ционному потоку;

г) задаются условия на внутренних границах области фильтрации (контурах дренажных и горных выработок);

д) на модели определяются величины потенциалов, а затем с помощью масштабных коэффициентов вычисляются значения потенциальных функций и других элементов фильтрационного потока.

2. Первым этапом моделирования (после составления модели фильтрационного поля) является задание граничных условий, а также учет наличия источников или стоков в пределах фильтрационного поля.

На границах фильтрационного поля или внутри его чаще всего могут быть заданы условия четырех родов (разд. III, гл.1, § 3).

а. Условия первого рода задаются наиболее просто: потенциальная функция в любой точке границы, отвечающая заданному напору, моделируется относительным электрическим потенциалом U_i, величина которого определяется по зависимости:

$$U_i = \frac{\varphi_i - \varphi_{min}}{\varphi_{max} - \varphi_{min}} (U_{max} - U_{min}) + U_{min} \qquad (1.20)$$

Для наиболее часто встречающегося случая, когда на модели $U_{max} = 1{,}0$, а $U_{min} = 0$, определение потенциалов U_i производится согласно таблице 13.

Таблица 13

Вид потенциальной функции	Формулы для определения относительного потенциала
$\varphi = H$	$U_i = \frac{H_i - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$ (1.21)
$\varphi' = 0{,}5\,h^2$	$U_i = \frac{h_i^2 - h^2_{min}}{h^2_{max} - h^2_{min}}$ (1.22)
$\varphi'' = \varphi_r$	$U_i = \frac{\varphi_{ri} - \varphi_{rmin}}{\varphi_{rmax} - \varphi_{rmin}}$ (1.23)

При моделировании какого-либо контура соответствующее значение электрического потенциала подается на модель из электропроводной бумаги через проложенную вдоль этого контура металлическую шину. Линейное изменение потенциальной функции вдоль контура моделируется на бумажных моделях с помощью особой шины, на концы которой подаются электрические потенциалы, соответствующие максимальному и минимальному значениям потенциальной функции по контуру. Эта шина должна обладать удельным сопротивлением, значительно меньшим, чем удельное сопротивление бумаги модели /2/. При изменении значения потенциальной функции вдоль контура по закону, отличному от линейного, моделирование может производиться с помощью отдельных коротких шин, на которые подаются известные значения потенциалов. В этом случае минимальная погрешность за счет дискретного расположения шин обеспечивается при расстояниях между концами шин l, равных их длине d (рис.49). Дополнительное сопротивление

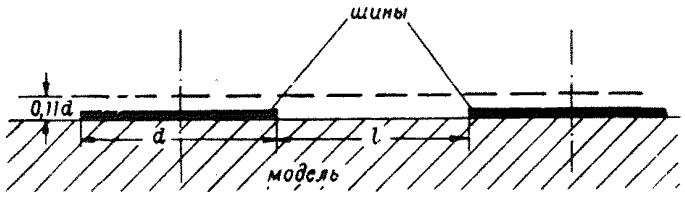


Рис.49. Схема дискретного расположения шин по обрезу модели.

за счет дискретного расположения шин по контуру как бы увеличивает размеры модели на величину 0,11 d (при $l = d$) /9/. Эта разница может быть учтена при изготовлении модели.

При моделировании поля фильтрации сеткой сопротивлений потенциалы подаются в узлы сетки, соответствующие границе фильтрационного поля.

б. При моделировании условий второго рода заданный расход на границе представляется в виде тока определенной силы. Согласно зависимости (1.17) и табл.12:

$$J = \frac{m_\Phi}{m_\varphi} (V_{max} - V_{min}) Q. \qquad (1.24)$$

Сила тока регулируется величиной дополнительного электрического сопротивления $R_д$, через которое ток подается в нужную точку или на контур, и величиной перепада потенциалов на этом сопротивлении. Величина сопротивления $R_д$ рассчитывается по зависимости:

$$R_д = \frac{\Delta U}{Q} \cdot \frac{m_\varphi}{m_\Phi}, \qquad (1.25)$$

где ΔU – произвольно назначаемая заранее разность потенциалов на концах сопротивления $R_д$, причем /1/ $\Delta U = (0{,}1 \div 0{,}3)(U_{max} - U_{min})$, m_φ и m_Φ – масштабные коэффициенты, определяемые в зависимости от характера фильтрации (табл.12).

Практически для получения тока заданной силы, пропорциональной моделируемому расходу, на вершине известного по величине сопротивления $R_д$ подбирается такая величина потенциала U_i', при которой в расчетной точке фиксируется потенциал U_i, т.е. подбирается заданный перепад потенциалов $\Delta U = U_i' - U_i$.

в. Условия третьего рода создаются на модели с помощью особых приемов, обеспечивающих заданный закон связи между значениями потенциальной функции и расходом.

г. Условия четвертого рода выполняются при моделировании автоматически – если модель поля фильтрации составлена с учетом проводимостей отдельных частей этого поля.

д. При моделировании профильных задач безнапорной фильтрации определение положения свободной поверхности производится методом подбора – путем подрезки бумажной модели или изменением величин сопротивлений сеточной модели (гл.II).

3. Для проверки соответствия природных граничных условий заданным на модели, а также правильности монтажа последней, определяются потенциалы на модели, а затем их значения сравниваются с известными напорами (уровнями) естественного потока подземных вод в соответственных точках. В случае резкого несоответствия электрических потенциалов на модели естественным напорам следует произвести проверку модели или пересмотреть первоначальную схемати-

зацию природных условий.

4. После проверки модели дополнительно задаются условия на контурах горных и дренажных выработок и определяются параметры модели, отвечающие искомым гидрогеологическим характеристикам потока.

§ 5. Особенности методики моделирования неустановившейся фильтрации

А. Электроинтеграторы

1. Электромоделирование неустановившейся фильтрации основано на схеме Либмана /5/. Поле фильтрации рассматривается как совокупность отдельных фильтрационных сопротивлений между фиксированными точками. Процесс фильтрации представляется в виде мгновенных скачкообразных изменений характеристик потока (напоров, уровней) в моменты времени, отличающиеся друг от друга на величину шага времени Δt. Моделирование заключается в отыскании значений этих характеристик потока в расчетный момент времени, отстоящий от начального на определенное число промежутков времени (шагов), равных Δt.

2. Конечно-разностное уравнение, выражающее баланс расходов для любой узловой точки планового поля фильтрации (рис.50) имеет вид /10/:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i - H_t}{\Phi_i} = \mu \frac{H_t - H_{t-\Delta t}}{\Delta t} \cdot F - \qquad (1.26)$$

- для напорного движения,

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{h_i - h_t}{\Phi_i} = \mu \frac{h_t - h_{t-\Delta t}}{\Delta t} \cdot F - \qquad (1.26а)$$

- для безнапорного движения;

H_t, H_i – напоры в расчетной и соседних с ней точках в момент времени t;

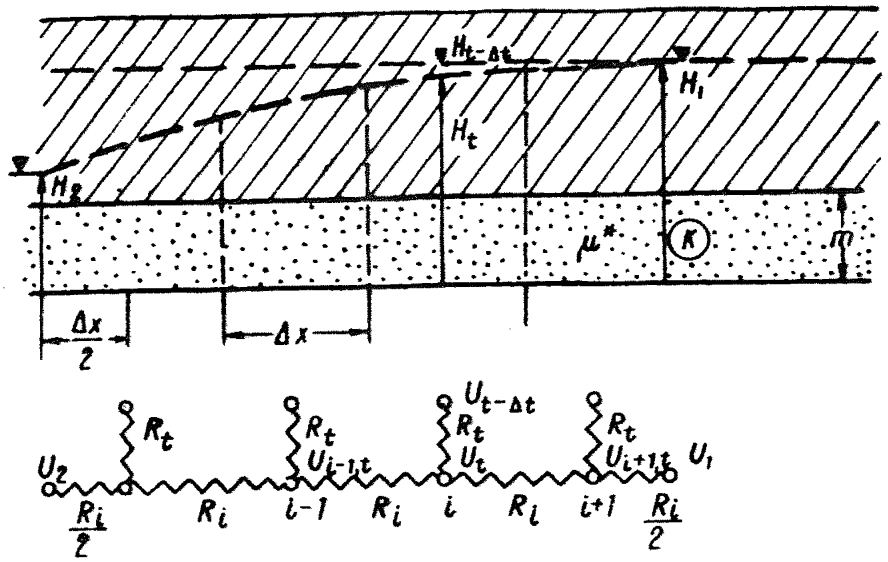


Рис.50. Схема к моделированию напорной неустановившейся фильтрации.

$H_{t-\Delta t}$ – напор в расчетной точке в момент времени $t-\Delta t$;

μ – водоотдача пород (при напорном режиме – упругая водоотдача μ^*);

Φ_i – фильтрационное сопротивление между расчетной узловой точкой и соседней с ней узловой точкой номер i ; выражения для фильтрационных сопротивлений определяются по формулам (1.7) (1.7а) или (1.11) (1.12);

F – площадь блока: $F=\Delta x \cdot 1$ — для одномерного плоскопараллельного потока, $F=\Delta x \cdot \Delta y$ – для двухмерного планового потока($\Delta x, \Delta y$ – выбранные размеры сетки по двум координатным осям),
$F=\pi(r_i^{12}-r_{i-1}^{12})$ – для осесимметричного потока (r_i^1, r_{i-1}^1 – расстояния от центра симметрии до границ выделенной кольцевой элементарной площадки);

n – число соседних с расчетной узловых точек:

$n=2$ – для одномерных потоков (плоского или осесимметричного) и $n=4$ – для планового двухмерного потока.

Если величина проводимости потока в выражениях для

фильтрационных сопротивлений может быть принята постоянной в пространстве и во времени, то при разбивке по квадратной сетке уравнения (1.26) - (1.26а) существенно упрощаются:

$$\sum_{i=1}^{i=n}(H_i - H_t) = \frac{H_t - H_{t-\Delta t}}{a^* \Delta t} F - \qquad (1.27)$$

- для напорного движения,

$$\sum_{i=1}^{i=n}(h_i - h_t) = \frac{h_t - h_{t-\Delta t}}{a \Delta t} F - \qquad (1.27а)$$

- для безнапорного движения.

Для случая безнапорного однородного потока с горизонтальным водоупором уравнение (1.26а) может быть представлено также в виде (рис.51):

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{h_i^2 - h_t^2}{\Phi_i'} = \frac{2\mu(h_t^2 - h_{t-\Delta t}^2)}{\Delta t(h_t + h_{t-\Delta t})} \cdot F, \qquad (1.28)$$

где Φ_i' - фильтрационные сопротивления, значения которых определяются по формулам (1.9) или (1.13);

h_t и $h_{t-\Delta t}$ - глубина потока в расчетной точке на моменты времени t и $(t - \Delta t)$;

h_i - глубина потока в точках, соседних с расчетной, на момент времени t.

При осреднении проводимости безнапорного потока на весь рассматриваемый период неустановившегося режима фильтрации (т.е. при введении коэффициента уровнепроводности a) уравнение (1.28) можно записать в виде (при разбивке поля фильтрации по квадратной сетке):

$$\sum_{i=1}^{i=n}(h_i^2 - h_t^2) = \frac{h_t^2 - h_{t-\Delta t}^2}{a \cdot \Delta t} \cdot F \qquad (1.29)$$

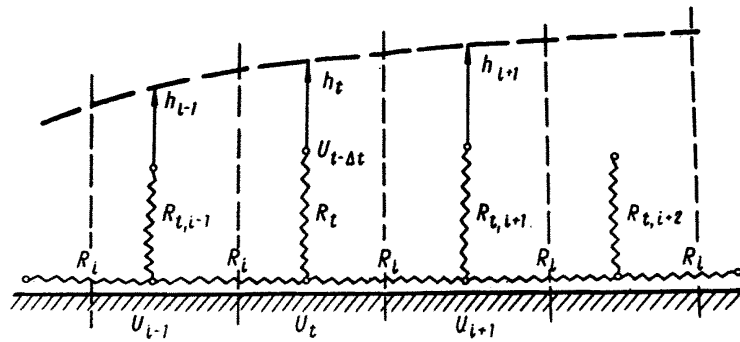


Рис.51. Схема к моделированию безнапорной неустановившейся фильтрации.

3. Уравнения (1.28) и (1.29) целесообразно применять только при моделировании безнапорных потоков при горизонтальном водоупоре, причем в большинстве случаев при решении практических задач можно ориентироваться на уравнение (1.29). Уравнение (1.28), которое является более точным, рекомендуется для расчетов в условиях истощения безнапорных водоносных горизонтов x)

Все остальные случаи требуют применения уравнений (1.26)-(1.27).

4. Электрическая сеточная модель, отвечающая схеме Либмана, имеет в узловых точках так называемые временные сопротивления R_t (рис.50,51). Если на вершины временных сопротивлений R_t подавать потенциалы $U_{t-\Delta t}$, отвечающие значениям потенциальной функции в узловых точках на момент времени $(t-\Delta t)$, то при заданных на границах модели граничных условиях уравнение тока в каждой узловой точке модели можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{U_i - U_t}{R_i} = \frac{U_i - U_{t-\Delta t}}{R_t}, \qquad (1.30)$$

где U_t – потенциал в расчетной узловой точке, отвечающий значению потенциальной функции на момент времени t в соответственной точке фильтрационного поля;

x) Например, на участке, оконтуренном дренажными штреками.

U_i – потенциалы в соседних с расчетной узловых точках, соответствующие значениям потенциальных функций на момент времени t ;

R_t – "временное" сопротивление,

R_i – электрическое сопротивление между расчетной узловой точкой и точкой номер i , отвечающее фильтрационному сопротивлению Φ_i .

5. Уравнение (1.30) является математическим аналогом уравнений (1.26)-(1.29).

а. Из сопоставления уравнений (1.26) и (1.30) видно, что величина временных сопротивлений R_t , в целях соблюдения аналогии между фильтрационными и электрическими параметрами, должна быть записана в следующем общем виде:

$$R_t = \frac{\Delta t}{m_\phi \cdot \mu^* \cdot F} \qquad (1.31)$$

или

$$R_t = \frac{\Delta t}{m_\phi \cdot \mu \cdot F} \qquad (1.31а)$$

Сопротивления R_i определяются в зависимости от величин фильтрационных сопротивлений, вычисляемых по формулам (1.7), (1.8) или (1.11), (1.12).

б. Если расчет ведется согласно уравнению (1.28), то

$$R_t = \frac{\Delta t (h_{t-\Delta t} + h_t)}{2 m_\phi \cdot \mu \cdot F} \qquad (1.32)$$

или, принимая в выражении (1.32) $\frac{h_{t-\Delta t}+h_t}{2} \approx h_{t-\Delta t}$,

$$R_t = \frac{\Delta t \cdot h_{t-\Delta t}}{m_\phi \cdot \mu \cdot F} \qquad (1.33)$$

В этих двух случаях сопротивления R_i определяются в зависимости от величин фильтрационных сопротивлений, вычисляемых по формулам (1.9) или (1.13).

в. При моделировании в соответствии с упрощенными (линейными) уравнениями (1.27) и (1.29) величина R_t

определяется соотношением:

$$R_t = \frac{a \Delta t R_i}{F} \qquad (1.34)$$

Для случая осесимметричной фильтрации формуле (1.34) отвечает формула:

$$R_t = \frac{2 R_i a \Delta t}{(r_i'^2 - r_i'^2) \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \qquad (1.35)$$

(Обозначения ясны из рис.52).

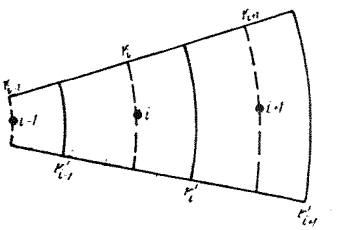


Рис.52. Схема разбивки на блоки при осесимметрической фильтрации.

6. Разбивка поля при моделировании неустановившейся фильтрации имеет некоторые особенности.

а. Если поле фильтрации имеет параллельные границы с заданной величиной налора, то разбивку поля фильтрации целесообразно производить с таким расчетом, чтобы внешние грани пограничных элементарных площадей приходились на границы пласта (рис.53-а). При такой

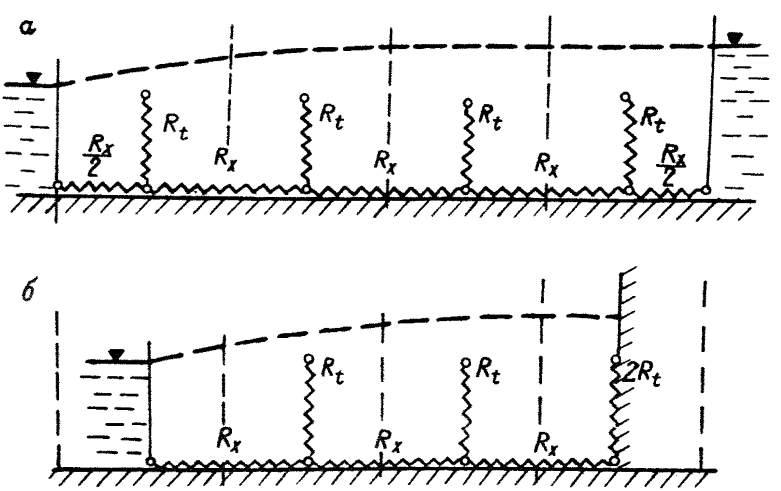


Рис.53. Схема к разбивке поля фильтрации при моделировании неустановившегося режима.

разбивке фильтрационные сопротивления между центрами элементарных площадей, прилегающих к границе, в направлении, перпендикулярном к ней, будут в два раза меньше, чем сопротивления между центрами элементарных площадей внутренней области фильтрационного поля; эта разбивка позволяет полнее учитывать сработку статических запасов подземных вод в пределах пограничных блоков (при изменении уровней на границе).

б. Если на параллельных границах заданными являются величины расходов (непроницаемые границы), то разбивка поля производится таким образом, чтобы его границы соответствовали центрам пограничных элементарных площадей (рис.53-б).

в. Разбивка поля фильтрации производится обычно, по квадратной сетке ($\Delta x=\Delta y$) с таким расчетом, чтобы между противоположными границами укладывалось не менее 3-4 элементарных площадей /11/. Так же, как и при моделировании установившейся фильтрации, при моделировании неустановившегося режима возможна неравномерная разбивка фильтрационного поля.

7. Продолжительность шага по времени Δt при неизменных (мгновенно изменяющихся) условиях на границе выбирается таким образом, чтобы расчетный период был разбит не менее, чем на три промежутка Δt /11/. Обычно при моделировании начальных стадий неустановившейся фильтрации величину шага по времени Δt целесообразно назначать небольшой, а затем укрупнять ее в процессе моделирования.

В случаях, когда изменение условий на границах может аппроксимироваться ступенчатым графиком /11/, величина шага Δt выбирается такой, чтобы период времени, в течение которого условия считаются неизменными, разбивался не менее, чем на три интервала.

8. Процесс моделирования после составления электрической модели, в общем случае, заключается в следующем /4/:

а) на вершины всех временных сопротивлений R_t подаются электрические потенциалы, соответствующие напорам

фильтрационного поля на начальный момент времени t_0 (т.е. на любой момент времени, для которого известно распределение напоров в пределах фильтрационого поля и который может быть принят за исходный); на границах модели задаются известные граничные условия;

б) в узловых точках модели измеряются потенциалы, отвечающие напорам в соответственных точках фильтрационного поля на момент времени $t_0 + \Delta t$;

в) полученные в узловых точках потенциалы подаются на вершины временных сопротивлений, с тем чтобы получить в узловых точках новые значения потенциалов, отвечающих напорам на момент времени $t_0 + 2\Delta t$, и т.д.

9. Указанная общая схема моделирования (п.8) несколько усложняется при решении задач безнапорной фильтрации, требующих учета изменения проводимости потока во времени:

а) при использовании в качестве потенциальной функции φ величины напора H (уравнение 1.26а), изменение проводимости потока учитывается изменением (подбором) сопротивлений R_i от одного шага времени к другому (см.подробнее гл.I);

б) при использовании в качестве потенциальной функции φ' величины $0{,}5\ h^2$ (уравнение 1.28), изменение проводимости потока учитывается подбором сопротивлений R_t от одного шага времени к другому - согласно формулам (1.32) или (1.33).

При моделировании фильтрации в линейной постановке (уравнения 1.27, 1.29) необходимость учета изменения проводимости отпадает, так что величины R_i и R_t в процессе моделирования остаются неизменными.

10. Определенными особенностями отличается также моделирование профильных двумерных задач безнапорной фильтрации.

Потенциальной функцией в этих условиях является величина напора (H). Сопротивления R_i вычисляются исходя из фильтрационных сопротивлений, определяемых по формулам (1.8) и (1.8а); в процессе решения задачи сопротивлениич R_i меняются от одного шага по времени к другому.

Временные сопротивления R_t присоединяются только к узлам блоков, в пределах которых располагается депрессионная кривая. Величина R_t определяется формулой (1.31а).

Б. Гидроинтеграторы

В отличие от сеточного электроинтегратора, при решении фильтрационных задач на гидравлическом интеграторе процесс, оставаясь дискретным по линейным координатам, непрерывен по времени (которое также моделируется).

1. Уравнение одномерной неустановившейся безнапорной фильтрации при потенциальной функции $\varphi = h$ можно представить в конечно-разностном виде для линейных координат и дифференциальном – для времени:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{h_i - h_t}{\Phi_i} = C \frac{\partial h_t}{\partial t} \qquad (1.36)$$

Фильтрационные сопротивления подсчитываются по формулам (1.7а) или (1.12).

Водоемкости отдельных блоков C определяются по выражению:

$$C = \mu \cdot F \qquad (1.37)$$

Для элемента гидравлической цепи уравнение процесса перетекания воды в сосудах прибора можно записать таким образом:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i' - h_t'}{\rho_i} = \frac{\partial h_t'}{\partial t'} \qquad (1.38)$$

Тождественность рассматриваемых уравнений будет выражена при условии, что

$$\rho_i = \frac{\Phi_i}{m_\varphi}; \qquad (1.39)$$

$$h_i' = \frac{h_i}{m_h} \qquad (1.40)$$

$$w_i = \frac{c}{m_c} \qquad (1.41)$$

$$\frac{\partial h'_t}{\partial t'} = \frac{\frac{\partial h_t}{\partial t}}{m_t} \qquad (1.42)$$

2. Критерием для выбора масштабов является:

а) для масштаба напоров - практическая высота сосудов прибора (до 50 см);

б) для масштаба емкостей - наличие в приборе максимальной площади поперечного сечения сосудов до 38 $см^2$ (возможно подключение дополнительных сосудов емкости);

в) для масштаба сопротивлений - максимальная и минимальная величины гидравлических сопротивлений прибора (диапазон изменения значений сопротивлений на трубках большого сопротивления - от 0,5 до 10 $мин/см^2$, на трубках малого сопротивления - от 0,05 до 1,2 $мин/см^2$);

г) для масштаба времени - соображения удобства моделирования.

Сводка масштабов моделирования приведена в табл.14 (для потенциальной функции $\varphi = h$).

Таблица 14

Наименование масштаба	Формула масштаба	Единицы измерения: в исследуемом процессе фильтрации подземных вод	Единицы измерения: в воспроизводящем его гидравлическом процессе на приборе
Масштаб напоров	$m_h = \frac{h}{h'}$, м/см	Глубина потока h, м	Столб воды в сосудах h', см
Масштаб ёмкостей	$m_c = \frac{c}{\omega_i}$, $м^2/см^2$	Водоёмкость блока C, $м^2$	Ёмкость сосуда ω_i, $см^2$
Масштаб сопротивлений	$m_\Phi = \frac{\Phi}{\rho}$, $\frac{сутки \cdot см^2}{мин \cdot м^2}$	Фильтрационное сопротивление Φ, $сутки/м^2$	Гидравлическое сопротивление ρ, $мин/см^2$
Масштаб расхода	$m_q = \frac{Q}{Q'}$, $\frac{м^3 \cdot мин}{сутки \cdot см^3}$	Расход Q, $м^3/сутки$	Расход Q' $см^3/мин$
Масштаб времени	$m_t = \frac{t}{t'}$, сут/мин	Время развития фильтрационного процесса t, сутки	Время протекания гидравлического процесса t', мин

С учетом колебаний температуры, расчетное время моделирования t'_{ϕ} определяется по выражению

$$t'_{\phi} = t'_{15} \cdot \beta_0, \qquad (1.43)$$

где t'_{15} – номинальное время работы на приборе при температуре воды 15°С;

β_0 – коэффициент, выражающий отношение вязкости воды при фактической температуре к вязкости ее при температуре 15°С (таблица 15).

3. Специфика решения задач неустановившейся безнапорной фильтрации на приборе заключается в том, что в результате дренажа водоносного горизонта происходит непрерывное уменьшение напоров в исследуемой области фильтрации, которое приводит к изменению начальных фильтрационных сопротивлений. Поэтому для сохранения постоянства масштаба времени необходимо изменять по такому же закону гидравлические сопротивления методом постепенного приближения (приложение № 6).

4. Если принять в качестве расчетной потенциальной функции $\varphi' = 0{,}5\,h^2$, и определять постоянные фильтрационные сопротивления по зависимости (1.9) или (1.13), то наиболее точное решение можно получить следующим образом:

а) выставляются значения емкостей сосудов, рассчитанные и начальное положение депрессионной кривой по формуле:

$$\omega_i = \frac{\mu F}{m_c \cdot h_{t-\Delta t}}; \qquad (1.44)$$

б) снимаются значения величин столбов воды на приборе h'_t;

в) глубина потока в каждом блоке на конец расчетного интервала времени определяется по формуле:

$$h_t = \sqrt{2 h'_t \cdot m'_h}; \qquad (1.45)$$

г) на приборе устанавливаются емкости сосудов:

$$\omega_i = \frac{2 \mu F}{m_c (h_{t-\Delta t} + h_t)}, \qquad (1.46)$$

Таблица 15

Значения коэффициентов β_0

t_c^o	β_0	t_c^o	β_0	t_c^o	β_0	t_c^o	β_0	t_c^o	β_0
5,0	1,324	10,6	1,125	16,2	0,970	21,8	0,845	27,4	0,744
5,2	1,316	10,8	1,119	16,4	0,965	22,0	0,841	27,6	0,740
5,4	1,308	11,0	1,113	16,6	0,960	22,2	0,837	27,8	0,737
5,6	1,301	11,2	1,107	16,8	0,955	22,4	0,833	28,0	0,734
5,8	1,293	11,4	1,101	17,0	0,951	22,6	0,829	28,2	0,731
6,0	1,285	11,6	1,095	17,2	0,946	22,8	0,825	28,4	0,728
6,2	1,277	11,8	1,089	17,4	0,941	23,0	0,821	28,6	0,725
6,4	1,270	12,0	1,083	17,6	0,936	23,2	0,817	28,8	0,722
6,6	1,262	12,2	1,077	17,8	0,932	23,4	0,813	29,0	0,719
6,8	1,255	12,4	1,071	18,0	0,927	23,6	0,810	29,2	0,716
7,0	1,247	12,6	1,066	18,2	0,922	23,8	0,807	29,4	0,713
7,2	1,240	12,8	1,060	18,4	0,918	24,0	0,803	29,6	0,710
7,4	1,233	13,0	1,054	18,6	0,913	24,2	0,799	29,8	0,707
7,6	1,225	13,2	1,048	18,8	0,909	24,4	0,796	30,0	0,704
7,8	1,247	13,4	1,043	19,0	0,904	24,6	0,792	30,2	0,701
8,0	1,211	13,6	1,037	19,2	0,900	24,8	0,789	30,4	0,698
8,2	1,204	13,8	1,031	19,4	0,895	25,0	0,785	30,6	0,695
8,4	1,197	14,0	1,026	19,6	0,891	25,2	0,781	30,8	0,692
8,6	1,191	14,2	1,021	19,8	0,886	25,4	0,778	31,0	0,689
8,8	1,184	14,4	1,016	20,0	0,882	25,6	0,774	31,2	0,686
9,0	1,177	14,6	1,010	20,2	0,878	25,8	0,771	31,4	0,683
9,2	1,170	14,8	1,005	20,4	0,873	26,0	0,767	31,6	0,680
9,4	1,164	15,0	1,000	20,6	0,869	26,2	0,764	31,8	0,678
9,6	1,157	15,2	0,995	20,8	0,865	26,4	0,760	32,0	0,675
9,8	1,151	15,4	0,990	21,0	0,861	26,6	0,757	32,2	0,672
10,0	1,144	15,6	0,985	21,2	0,857	26,8	0,753	32,4	0,669
10,2	1,138	15,8	0,980	21,4	0,853	27,0	0,750	32,6	0,667
10,4	1,132	16,0	0,975	21,6	0,849	27,2	0,747	32,8	0,664
								33,0	0,661

подсчитанные для значений глубин потока, соответствующих среднему положению депрессионной кривой за расчетный интервал времени; такой пересчет на среднее положение депрессионной кривой за расчетный интервал времени повторяют до полного совпадения двух последовательно получаемых депрессионных кривых.

Менее точное решение задачи при $\varphi' = 0{,}5\,h^2$ можно получить, если расчет емкостей сосудов на приборе производить, исходя из положений депрессионной поверхности на начало каждого расчетного интервала времени.

5. При решении двумерных в вертикальном сечении и пространственных задач область фильтрации воспроизводится, соответственно, двумерной в разрезе или пространственной решеткой гидравлических сопротивлений, которые в верхнем ряду, в пределах элементарных блоков с изменяющимся уровнем, соединяются с сосудами емкости, а в нижних рядах соединяются непосредственно друг с другом в узловых точках.

Пример моделирования на гидроинтеграторе приведен в приложении № 6.

ГЛАВА II

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ К ОТКРЫТЫМ ГОРНЫМ ВЫРАБОТКАМ

§ 1. Моделирование установившейся фильтрации

1. При расчетах обычно определяется величина общего притока в карьер и величина удельного водопритока. При определении общего притока в карьер моделирование следует считать необходимым для сложных расчетных схем (разд.III, гл.1, § 4), для которых не найдено аналитических решений. Определение удельных водопритоков к карьеру методом моделирования целесообразно производить

в тех случаях, когда распределение удельных водопритоков по контуру карьера неравномерно. Эта неравномерность определяется, с одной стороны, характером ориентировки различных границ относительно карьера и, с другой стороны, сложной, как правило, конфигурацией карьера.

2. При моделировании плановой фильтрации на интеграторе ЭГДА для определения общего притока к карьеру в общем случае необходимо провести расчет по выделенным лентам тока (п.3). Однако, для простейшего случая, когда модель ограничена только непроницаемыми контурами и контурами с постоянными напорами $H = H_1$ и $H = H_2$, нет необходимости строить на модели сетку движения и вычислять суммарный приток по выделенным лентам тока. В этом случае достаточно определить величину общего притока, замеряя сопротивление модели между шиной, проложенной по контуру карьера, и шиной, моделирующей границу с постоянным напором [x]. Общий приток к карьеру может быть вычислен по формуле:

$$Q_к = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{m_ф R_м}, \qquad (II.1)$$

где φ_1 и φ_2 - значения потенциальной функции на контурах питания и дренажа, $R_м$ - сопротивление модели.

Расчет по такой методике производится в том случае, когда в пределах исследуемой области фильтрации процессами инфильтрации и перетекания можно пренебречь. [xx]

При отсутствии омметра определение сопротивления модели можно осуществить, используя эталонное сопротив-

---

x) Для пластов с одной фиксированной границей питания модель фильтрационного поля рекомендуется /10/ ограничивать обрезом бумаги по окружности радиуса $r = (2,5-5,0)L$, где L - расстояние от центра карьера до границы питания.

xx) Если инфильтрация или перетекание учитываются при составлении модели введением фиктивной водопроводимости /6/, то расчет водопритоков также можно проводить по формуле /II.1/.

ление $R_{эт}$, подключаемое к модели последовательно. В этом случае сопротивление $R_м$ можно вычислить по формуле:

$$R_м = \frac{R_{эт}(1-U)}{U}, \qquad (II.2)$$

где U – потенциал в точке соединения модели с эталонным сопротивлением (рис.56).

3. При определении удельных водопритоков к разным участкам карьера построение сетки движения является обязательным. Методика построения сетки движения при моделировании на электропроводной бумаге состоит в следующем /2,3,10/.

На шины, воспроизводящие границы исследуемой области фильтрации, подаются заданные потенциалы. Полную разность потенциалов делят на равные доли. Установив реохорд на одно из принятых значений потенциалов, передвигают иглу измерительного устройства по модели и находят на ней ряд точек, потенциалы в которых соответствуют заданному на реохорде. Соединив точки плавной кривой, получают на модели линию равного потенциала, соответствующую в натуре линии равных напоров.

Таким образом, получают линии равных потенциалов для всей области фильтрации. Линии тока можно строить либо графическим путем, либо (для простейших случаев, см.п.2) путем решения так называемых "обращенных" задач /10/; шины устанавливают по непроницаемым границам модели, отвечающим прямой задаче, и описанным выше методом строят эквипотенциальные линии, соответствующие линиям тока прямой задачи.

План взаимно перпендикулярных линий равных потенциалов и линий токов дает сетку движения потока подземных вод, при помощи которой можно определить гидрогеологические параметры на любом участке.

4. Расчет притока в пределах ленты, наряду с аналитическими приемами (см.раздел III, гл.11, § 2), можно производить, используя принцип электроаналогии. Для этого замеряется (омметром) электрическое сопротивление ленты $R_л$; для этой же цели может быть использовано эталон-

ное сопротивление $R_{эт}$ (п.2). Расход в пределах ленты определяется по зависимости (II.1).

5. Описанная методика моделирования применима для всех случаев плановой напорной фильтрации, а также для плановой безнапорной фильтрации в однородных (при горизонтальном водоупоре), неоднородных в плане и горизонтально-слоистых средах.

6. Для безнапорной фильтрации в толщах, неоднородных одновременно и в разрезе и в плане, а также для безнапорной плановой фильтрации при наличии уклона водоупора более целесообразно прибегать к моделированию на сеточных моделях x).

7. Упомянутые в п.6 задачи могут решаться (приближенно) и на бумажных моделях. Для этого рекомендуется следующая методика:

а) строится сетка движения на модели, с учетом неоднородности горизонта в плане; моделирование производится, как для напорного пласта со средней мощностью

$$m_{ср} = \frac{(m_1 + m_2)}{2};$$

б) пьезоизогипсы такого условного напорного пласта, полученные по данным моделирования, принимаются за гидроизогипсы безнапорного горизонта, по которым составляется карта водопроводимости последнего. Дальнейшее повторное моделирование производится на новой модели, причем электропроводность различных частей модели подбирается с учетом проводимости зон, выделенных при построении карты водопроводимости;

в) по результатам повторного моделирования плановой фильтрации строится сетка движения и выделяются расчетные ленты тока;

---

x) Сеточные модели предпочтительнее и в тех случаях напорной фильтрации, когда из-за частого изменения проводимости в пределах поля фильтрации трудно изготовить соответствующую бумажную модель.

г) ленты тока приводятся к эквивалентным плоским либо аналитическим (разд.III,гл.II,§ 2), либо путем замера электрического сопротивления двухмерной ленты $R_л$ и подбора длины плоской ленты (равной ширины) с таким же сопротивлением $R_л$. При наличии элементов неоднородности приведение к плоской ленте производится по отдельным однородным участкам, причем на плоской ленте фиксируются приведенные границы неоднородности. По ленте, приведенной к плоской, строится вертикальный разрез таким образом, чтобы он отражал строение (неоднородность) отдельных частей ленты;

д) дальнейшее моделирование производится в разрезе (профильная задача).

Аналогичным образом можно производить моделирование безнапорного водоносного горизонта с учетом уклона водоупора.

8. Необходимость моделирования профильных задач возникает во всех случаях, когда требуется найти распределение напоров вблизи области стока (например, вблизи борта карьера или несовершенной выработки), где пренебрежение вертикальной составляющей скорости фильтрации может привести к значительным погрешностям (в частности, при необходимости учета несовершенства линейных выработок), при расчетах фильтрации в пределах неоднородных и в плане, и в разрезе безнапорных потоков (см.п.7), при расчете безнапорной фильтрации в условиях наклонного залегания водоупора (особенно при переменных уклонах по направлению потока).

а. Для построения разреза вдоль ленты тока ее необходимо предварительно привести к эквивалентной плоской ленте (см.п.6), после чего составляется профильная (обычно бумажная) модель, с учетом неоднородностей и границ этих неоднородностей.

б. Для напорных горизонтов после построения бумажной модели можно замерить ее электрическое сопротивление $R_{пм}$, и затем определить расход по ленте, пользуясь зависимостью:

$$Q_л = \frac{B(H_1 - H_2)}{R_{пм} \cdot m_ф}, \qquad (II.3)$$

где H_1 и H_2 – напоры на внешней и внутренней границах ленты,

B – ширина плоской ленты.

При необходимости определения напоров на профильной модели строится сетка движения, а переход от электрического потенциала к величине напора H_i производится по формуле (1.20).

в. Моделирование двумерных задач безнапорной фильтрации [x] осложняется подбором депрессионной кривой, определяющей положение верхней границы модели. Методика такого подбора в достаточной степени отработана /2,3/ и заключается в постепенном подрезании верхнего края электропроводной бумаги до тех пор, пока потенциалы в точках пересечения подбираемой депрессионной кривой с предварительно проведенными вспомогательными горизонтальными линиями не будут соответствовать высотному положению этих точек (верхняя из проведенных вспомогательных горизонталей соответствует максимальному напору, а нижняя – минимальному).

При моделировании безнапорного горизонта с учетом уклона водоупора нижняя граница модели обрезается по водоупору, уклон которого фиксируется относительно выбранной горизонтальной линии отсчета напоров. После определения верхней границы модели безнапорного горизонта дальнейший расчет расходов и напоров производится по формулам (II.3) и (1.21).

г. При моделировании безнапорных потоков в разрезе вблизи фильтрующего откоса часто возникает необходимость учета линейного падения напора вдоль промежутка высачивания. Линейность распределения потенциалов на промежутке высачивания достигается с помощью шины, электропроводность которой должна быть значительно выше электропроводности материала модели. Длина шины выбирается с

---

x) В качестве потенциальной функции принимается пьезометрический напор H.

таким расчетом, чтобы ею перекрывался промежуток высачивания. На нижний конец шины при моделировании профильной задачи подается потенциал, отвечающий дну выработки (или уровню воды в затопленной выработке), а на верхний конец шины подается потенциал, соответствующий его высотному положению.

д. В ряде случаев при моделировании в разрезе возникает необходимость искажения вертикального масштаба модели в целях уменьшения ее длины или достижения большей детальности разреза. Такое искажение для однородных по проницаемости горизонтов требует создания анизотропии бумаги /3/, что является трудоемким процессом. Однако, при моделировании неоднородных в разрезе горизонтов с резко меняющейся проницаемостью отдельных слоев или линз ($\frac{k_1 m_1}{k_2 m_2} > 10\text{-}20$) В.М.Шестаковым предлагается /11/ использовать принцип Н.К.Гиринского-А.М.Мятиева. При увеличении вертикального масштаба по сравнению с горизонтальным в несколько раз величина расчетного коэффициента фильтрации слабопроницаемого элемента увеличивается, а для более проницаемого - уменьшается, соответственно, во столько же раз. После составления модели такого неоднородного горизонта дальнейший процесс моделирования и расчета не отличается от моделирования неоднородных горизонтов в неискаженном масштабе.

е. При невозможности искажения вертикального масштаба модели в некоторых случаях целесообразно производить моделирование профильных задач на сеточных моделях. При моделировании безнапорной фильтрации электрические сопротивления пересчитываются (методом последовательных приближений) до момента полного совпадения значений глубины потока с соответствующими значениями потенциалов в узловых точках, отвечающих положению депрессионной кривой.

9. Несовершенство горных выработок при моделировании может учитываться различными способами.

а. В ряде случаев, для которых получены конечные аналитические выражения, несовершенные выработки могут заменяться совершенными (разд.III, гл.III,§ 2).

б. В тех случаях, для которых аналитические решения отсутствуют, дополнительное фильтрационное сопротивление за счет несовершенства ($\Delta\Phi_н$) может определяться на профильных моделях путем замера их электрических сопротивлений при неполном вскрытии горизонта выработкой ($R_{н.пр}$) и при полном вскрытии ($R_{сов.пр.}$). Профильная модель в этом случае ограничивается длиной, равной трехчетырехкратной мощности горизонта. Дополнительное фильтрационное сопротивление $\Delta\Phi_н$ определяется по формуле:

$$\Delta\Phi_н = (R_{н.пр} - R_{сов.пр}) \cdot m_{ф\,пр}, \qquad (II.4)$$

где $m_{ф пр} = \frac{1}{k\,\rho_0}$ (при моделировании на бумажных моделях).

Такой метод определения сопротивления за счет несовершенства применим в тех случаях, когда длина выработки в несколько раз превышает мощность пласта. В случае трехмерного характера течения к несовершенной выработке дополнительное фильтрационное сопротивление за счет несовершенства определяется на трехмерных (объемных) моделях; при этом целесообразно определять сразу электрическое сопротивление, учитывающее это несовершенство, замеряя величину общего сопротивления модели и вычитая из нее величину сопротивления модели от границ до совершенной выработки той же конфигурации в плане, что и несовершенная.

Дополнительное фильтрационное сопротивление ($\Delta\Phi_н$) при моделировании плановых задач учитывается введением в модель дополнительного сопротивления $R_{н.пл}$, вычисляемого по формулам:

$$R_{н.пл} = \frac{\Delta\Phi_н}{B \cdot m_ф} - \qquad (П.5)$$

– при выборе в качестве потенциальной функции величины напора H (здесь B – периметр выработки), или

$$R_{н.пл} = \frac{\Delta\Phi_н \cdot h_{ср}}{B \cdot m_ф} - \qquad (П.6)$$

– при потенциальной функции $\varphi' = 0{,}5\ h^2$, где $h_{ср}$ –

средняя глубина потока вблизи выработки.

Дополнительное электрическое сопротивление присоединяется к плановой модели через шину, моделирующую контур выработки, или к узловым точкам сеточной модели, соответствующим этому контуру; заданный граничный потенциал подается на вершину дополнительного сопротивления.

в. При моделировании двумерных профильных задач (на сетке или на бумаге) несовершенство горной выработки учитывается самой моделью.

§ 2. Моделирование неустановившейся фильтрации

А. Сеточные модели

1. Для моделирования используется схема Либмана (гл.1, § 5). В общем случае решение должно производиться по уравнениям (1.26) – (1.27), когда потенциальная функция соответствует величине напора. При однородной водоносной толще, подстилаемой горизонтальным водоупором, в качестве потенциальной функции может быть принята величина $\varphi' = 0{,}5\,H^2$ (для безнапорной фильтрации); схема моделирования строится в этом случае согласно уравнениям (1.28) или (1.29).

Фильтрационные сопротивления по координатам x и y подсчитываются по формулам (1.7), (1.9), (1.10), а временные сопротивления – по зависимостям (1.31)–(1.34).

2. Для проверки соответствия потенциалов на модели уровням в натуре в начальный момент времени замеряют потенциалы в узловых точках (не присоединяя временных сопротивлений); за.ем, пользуясь масштабными соотношениями (1.15), приводят полученные величины к натуре и сравнивают их со значениями напоров, определенных по карте гидроизогипс. Совпадение замеренных на приборе и вычисленных аналитически величин глубин потока подземных вод указывает на правильность исходных потенциалов. После

этого выставляют временные сопротивления, соответствующие первому шагу по времени, и просоединяют электрические сопротивления, моделирующие зону вблизи карьера.

3. При использовании для моделирования безнапорных потоков потенциальной функции $\varphi = H$ учет изменения их проводимости во времени производится путем подбора сопротивлений R_i от шага к шагу по времени. В общем случае, когда моделирование ведется в соответствии с уравнением (1.26а), методика подбора сопротивлений может быть следующей:

а) исходя из средней глубины потока между расчетной узловой точкой и соседними с нею точками на начальный момент времени, по формуле (1.7а) вычисляются фильтрационные сопротивления Φ_i, а затем - величины сопротивления R_i;

б) на вершины временных сопротивлений подаются потенциалы, отвечающие напорам в начальный момент времени, и замеряются потенциалы в узловых точках; исходя из замеренных значений потенциалов вычисляются мощности потока в этих точках и соответствующие им значения сопротивлений R_i;

в) устанавливаются все вычисленные таким образом сопротивления и вновь замеряются потенциалы в узловых точках, и т.д. - до тех пор, пока величины H не будут соответствовать значениям мощности потока. Каждый шаг по времени должен сопровождаться, по меньшей мере, двумя попытками подачи потенциала на вершину временного сопротивления для каждой точки, с двукратным изменением величин R_i. В начале процесса моделирования, при резком изменении положения депрессионной кривой от шага к шагу, число таких попыток может достигать 4-5.

4. При моделировании безнапорных горизонтов согласно уравнению (1.28), когда потенциальная функция $\varphi' = 0{,}5\,h^2$, - в процессе моделирования изменяются величины временных сопротивлений R_t при неизменных величинах сопротивлений R_i. Изменение R_t производится подбором от шага к шагу по времени, в соответствии с формулой (1.32). Кроме того, согласно формуле (1.33), можно

получить приближенное решение прямым пересчетом сопротивлений R_t от шага к шагу по времени.

5. Определение притоков к отдельным участкам или к карьеру в целом производится путем замера силы тока (формула 1.17) или расчетом – по полученным значениям уровней в точках, прилежащих к карьеру.

Б. Приближенный метод расчета притоков к карьеру методом недеформируемых линий тока

1. Одним из приближенных приемов расчета неустановившейся плановой фильтрации на интеграторе ЭГДА является метод, в основе которого лежит принцип недеформируемых линий тока (раздел Ш,гл.1У,§ 4). Этот метод заключается в следующем:

а) на плановой модели из электропроводной бумаги строится сетка движения и выделяются расчетные ленты как для установившегося режима фильтрации. Для повышения точности построения этих лент и учета деформации их во времени, сетку движения целесообразно строить на несколько моментов времени, считая что на каждый момент времени t поле фильтрации ограничивается областью, размеры которой определяются величиной условного радиуса влияния (разд.Ш,гл.1У,§ 4) и фиксированными границами пласта (областью обеспеченного питания или непроницаемой границей). При построении сетки движения на внешние границы этой области подаются потенциалы, отвечающие естественным уровням, что позволяет учитывать влияние естественного потока на характер фильтрации;

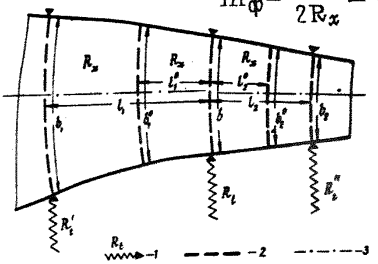
б) после выделения расчетных лент тока производится расчет расходов и уровней по ним на несколько моментов времени (п.2).

2. При однородном строении водоносного горизонта расчет притоков по ленте тока может быть выполнен аналитически (см.раздел Ш,гл.1У,§ 4). При необходимости определения уровней в процессе неустановившейся фильтрации по выделенной ленте, а также при наличии в преде-

лах ленты внутренних источников (стоков) или при фильтрационной неоднородности ленты, когда использование понятия об условном радиусе влияния становится невозможным, осуществляется моделирование в пределах лент тока по модифицированной одномерной схеме Либмана.

а. Лента тока делится эквипотенциалями на элементарные площади – фрагменты, обладающие равными фильтрационными сопротивлениями. Если шины с присоединенными к ним временными сопротивлениями проложить по выделенным на ленте эквипотенциалям через одну (рис.54), то к каждому временному сопротивлению справа и слева будут примыкать фрагменты с электрическим сопротивлением R_x, а фильтрационному сопротивлению Φ_x участка ленты между шинами будет соответствовать электрическое сопротивление $2R_x$. Масштаб сопротивлений в данном случае будет равен:

$$m_\varphi = \frac{\Phi_x}{2R_x} = \frac{l_1^0 + l_2^0}{R_x \cdot k m (b_1^0 + b_2^0)} \qquad (II.7)$$



1–Временные сопротивления с шинами, 2–эквипотенциали, 3–осевая линия.

Рис.54. Моделирование по схеме Либмана в пределах ленты тока.

(обозначения ясны из рис.54.).

б. Выражения для временного сопротивления R_t могут быть представлены в виде:

$$R_t = \frac{2R_x \cdot km \cdot \Delta t}{\mu (l_1^0 + l_2^0)^2} \qquad (П.8)$$

при потенциальной функции $\varphi = H$ (для безнапорного движения $m = h_t$);

$$R_t = \frac{R_x \cdot k \cdot \Delta t (h_{t-\Delta t} + h_t)}{\mu (l_1^0 + l_2^0)^2} \qquad (П.9)$$

или приближенно

$$R_t = \frac{2R_x \cdot k \cdot \Delta t \cdot h_{t-\Delta t}}{\mu (l_1^0 + l_2^0)^2} \qquad (П.10)$$

– для потенциальной функции $\varphi = 0{,}5\, h^2$,

$$R_t = \frac{2R_x \cdot a \cdot \Delta t}{(l_1^0 + l_2^0)^2} - \qquad (П.11)$$

– при решении задачи в линейной постановке (т.е. с использованием величины коэффициента уровнепроводности a).

Таким образом, при моделировании по схеме Либмана в этом случае все временные сопротивления вдоль ленты тока будут разными по величине (как для напорного, так и для безнапорного движения).

в. При моделировании неустановившейся фильтрации в пределах ленты, воспроизводящей участок "неограниченного" пласта, потенциалы, отвечающие уровням (напорам) на ее внешней границе, подаются через временное сопротивление. Расчетная лента, таким образом, ограничивается фиктивным непроницаемым контуром с тем, чтобы фиксировать снижение напоров на нем. Если в процессе моделирования наблюдается существенное снижение уровней (напоров) на внешней границе ленты, то необходимо несколько увеличить длину последней и произвести повторное моделирование с момента зафиксированного снижения напоров.

г. Моделирование фильтрации в пределах выделенной ленты тока технически наиболее просто осуществлять на цепочке переменных сопротивлений – после того, как из бумаги будет вырезана расчетная лента, разделена эквипотенциалями на 10–20 фрагментов и замерены сопротивления фрагментов R_x , а также их длина l_i^0 и ширина b_i^0 . Замена бумажной модели цепочкой переменных сопротивлений особенно целесообразна для безнапорных потоков при решении задач в нелинейной постановке, когда требуется учитывать изменение проводимости потока на отдельных участках путем подбора сопротивлений R_x при неизменных величинах сопротивлений R_t (например, при моделировании неоднородных в разрезе потоков или при наличии уклона водоупора).

3. Описанный метод расчета является менее точным, чем моделирование на сетке (п.А); однако, ввиду своей относительной простоты и достаточной надежности, он может с успехом применяться при решении практических задач.

ГЛАВА Ш

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ К ДРЕНАЖНЫМ УСТРОЙСТВАМ

§ 1. Моделирование установившейся фильтрации к вертикальным дренажным скважинам

1. Одиночные скважины на бумажных плановых моделях моделируются цилиндрическими электродами диаметром 4-6 мм, прикрепляемыми к электропроводной бумаге. Для учета действительного радиуса скважин в масштабе модели (r_c') потенциал, отвечающий напору или уровню в скважине, подается на электрод через дополнительное сопротивление, величина которого $R_{эл}$ определяется по формуле /11/:

$$R_{эл} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r_{эл}}{r_c'} , \qquad (Ш.1)$$

где $r_{эл}$ - радиус электрода в масштабе модели.

Дополнительное сопротивление $R_{эл}$ вводится в электрическую схему модели обычно при заданной величине напора в скважине, но его целесообразно вводить и при заданном дебите скважины. В последнем случае сопротивление $R_{эл}$ вводится последовательно между моделью и дополнительным сопротивлением $R_д$, обеспечивающим ток постоянной силы (гл.1, § 4, п.2-б).

2. При моделировании отдельных скважин на сеточных моделях к узловой точке, соответствующей положению скважины, присоединяется дополнительное сопротивление R_0, учитывающее одновременно действительный радиус скважины r_c и осесимметричный характер потока в блоке, содержащем скважину. Величина сопротивления R_0 равна /11/:

$$R_0 = \frac{1}{2m_ф \cdot \pi k m} \left(\ln \frac{\Delta x}{r_c} - 1{,}42 \right) - \qquad (Ш.2)$$

при потенциальной функции $\varphi = H$ или $\varphi = h$ (для безнапорного движения $m = h_{ср}$);

$$R_0 = \frac{1}{2 m_\varphi \pi k} \left(\ln \frac{\Delta x}{r_c} - 1{,}42 \right) - \qquad (Ш.3)$$

при потенциальной функции $\varphi = 0{,}5 h^2$.

3. Потенциал, отвечающий уровню воды в скважине (если этот уровень является заданным), подается на вершины дополнительных сопротивлений $R_{эл}$ (для бумажных моделей) или R_0 (для сеточных моделей). Если заданной является величина расхода скважины, то как для бумажных, так и для сеточных моделей, этот расход моделируется током постоянной силы, подаваемым через дополнительное сопротивление $R_э$.

4. При моделировании несовершенных скважин удобно учитывать несовершенство путем предварительного расчета радиуса эквивалентной совершенной скважины (разд. Ш, гл.Ш, § 2), величина которого и закладывается затем в формулы для определения $R_{эл}$ или R_0 .

При моделировании несовершенных скважин в условиях слоистых толщ, для которых отсутствуют аналитические решения, необходимо предварительно определять дополнительное фильтрационное сопротивление скважин, обусловленное их несовершенством, аналогично тому, как это изложено в гл.II, § 1, п.9.

5. При необходимости расчета большого числа скважин с заданными расходами целесообразно предварительно определить на бумажных моделях функцию понижения (разд.Ш, гл.У, § 1).

а. Для определения функции понижения от действия отдельной скважины в расчетной точке М фильтрационного поля к бумажной модели этого поля присоединяется сопротивление $R_{эт}$ по схеме, приведенной на рис.55. На конец сопротивления $R_{эт}$ подается потенциал $U = 1{,}0$, а на границу модели с заданной величиной напора-потенциал $U = 0$. Сопротивление $R_{эт}$ последовательно присоединяется к электроду, моделирующему расчетную скважи-

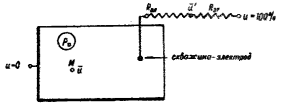


Рис.55. Схема к определению функции понижения.

ну, через дополнительное сопротивление $R_{эл}$, величина которого определяется по формуле (III.1). Величину эталонного сопротивления $R_{эт}$ при определении функции понижения удобно принимать равной сопротивлению квадрата бумаги модели $\rho_{\square}$. Функция понижения f_c в точке M от действия расчетной скважины определяется по формуле:

$$f_c = \frac{\bar{U}}{1-\bar{U}'} \cdot \frac{R_{эт}}{\rho_{\square}}, \qquad (III.4)$$

где $\bar{U}$ – значение потенциала в точке M модели, для которой определяется функция понижения;

$\bar{U}'$ – потенциал на скважине (на вершине $R_{эл}$).

б. При определении функции понижения в самой скважине в формуле (III.4) $\bar{U} = \bar{U}'$.

в. В тех случаях, когда водоносный горизонт имеет одну или несколько границ с заданной величиной расхода (отличного от нулевого), необходимо определять функции понижения в расчетных точках от действия этих границ.

6. Контурные и линейные системы скважин на участках равномерной их расстановки (через расстояние δ) могут моделироваться упрощенными приемами.

а. На бумажных плановых моделях такие системы моделируются сплошной металлической шиной. Потенциал, отвечающий уровню воды в скважинах (если последний является заданным и одинаковым для всех скважин участка контура), подается на шину через дополнительное сопротивление $R_{конт.}$, определяемое по формуле:

$$R_{конт.} = \frac{\delta \rho}{B \cdot 2\pi} \ln \frac{\delta}{\pi d_c}, \qquad (III.5)$$

где B – длина контура,

d_c – диаметр скважины.

б. При моделировании контурной системы скважин на сеточных плановых моделях потенциалы, отвечающие

уровням в скважинах, подаются в узловые точки, лежащие на линии контура, через дополнительные сопротивления $R_{конт.\,\Delta x}$, равные:

$$R_{конт\,\Delta x} = \frac{6 \ln \frac{6}{\pi d_c}}{2\pi k m B_i \cdot m_\phi} - \qquad (III.6)$$

при потенциальной функции $\varphi = H$ (для безнапорного движения $m = h_{ср}$);

$$R_{конт\,\Delta x} = \frac{6 \ln \frac{6}{\pi d_c}}{2\pi k B_i \cdot m_\phi} - \qquad (III.7)$$

при потенциальной функции $\varphi' = 0{,}5 \cdot h^2$, где B_i - длина участка контура.

в. Если заданной является величина расхода скважин, то суммарный расход по участку контура скважин моделируется током постоянной силы, проходящим через дополнительное сопротивление $R_д$ (гл.1, § 4п.2б), которое включается последовательно с дополнительным сопротивлением $R_{конт}$. Потенциал между этими сопротивлениями отвечает уровню в скважинах, а потенциал на шине - среднему уровню на линии скважин.

7. При определении оптимальной расстановки скважин в пределах контура, окружающего с о в е р ш е н н ы й котлован, моделирование можно выполнять в следующем порядке:

а. Строится сетка движения для области между контуром скважин и карьером, для чего моделируется только эта область при потенциале на контуре скважины $U_1 = 1{,}0$, а на контуре карьера $U_2 = 0$.

б. Исходя из допустимых притоков к борту карьера (см. раздел II, гл.II, § 1), определяется уровень (напор) h_ϕ (H_ϕ) на линии ряда скважин для всех выделенных лент тока (этот уровень может быть различным для разных лент). Величина h_ϕ (H_ϕ) может быть определена расчетом по формулам (III.1) и (III.2) раздела III после приведения ленты к плоской.

в. Каждый из выделенных участков контура моделируется отдельной шиной, к которой присоединяется пере-

менное сопротивление R конт., максимальная величина которого должна быть порядка $\frac{\rho_{\text{п}} \delta}{B_i}$ (где B_i - длина участка, δ - ориентировочное максимальное расстояние между скважинами по участку).

На вершину сопротивления R конт., подается потенциал, отвечающий уровням в скважинах участка, после чего производится изменение величины R конт. на всех участках до тех пор, пока потенциалы на шинах не будут соответствовать величинам, определенным согласно п.б; регулировку удобнее начинать с максимальных или минимальных величин сопротивлений на всех участках (при потенциалах на контуре карьера и контурах питания пласта, соответствующих заданным уровням или напорам).

г. Исходя из полученных значений сопротивлений $R_{конт}$ и потенциалов на их концах, определяется суммарный дебит скважин в пределах участка $Q_{уч.i}$ по формуле (II.1); расстояния между скважинами δ_i определяются по формуле (III.5).

Производительность одной скважины определяется по зависимости

$$Q_{c,i} = \frac{Q_{уч.i} \cdot \delta_i}{B_i}. \qquad (III.8)$$

д. Если число выделенных участков контура велико (более 3-4), то подбор сопротивлений R конт. затруднителен, так что в этом случае проще провести аналитический расчет по лентам тока, построенным для всего поля фильтрации (включая и внешнюю законтурную область); такой расчет ведется согласно рекомендациям раздела III гл.У § 2.

е. Для скважин, оборудованных насосами, полученные при моделировании (или расчетом) величины расстояний между скважинами δ_i и расходы скважин $Q_{c,i}$ не могут считаться окончательными, так как они будут оптимальными лишь при оборудовании скважин на различных участках насосами различной производительности. Для окончательного выбора насосов (одного типа) и оптимального расстояния между скважинами расчет проводится в следующей после-

довательности:

задается производительность насоса $Q_н$, причем

$$\min Q_{c,i} \leqslant Q_н \leqslant \max Q_{c,i};$$

для участков, где $Q_н \geqslant Q_{c,i}$ расстояние между скважинами сохраняется равным δ_i ; в этом случае скважины будут работать с расходами $Q_{c,i}$:

для участков, где $Q_н < Q_{c,i}$, расстояние между скважинами определяется по формуле

$$\delta_i = \frac{B_i\, Q_н}{Q_{уч,i}}, \qquad (III.9)$$

причем скважины на этих участках будут работать с расходом $Q_{c,i} = Q_н$, уровень на линии ряда сохранится равным $h_{ф,i}$, а уровень в скважинах будет выше первоначально принятого.

8. Для определения расстановки водопонизительных скважин, расположенных по контуру несовершенного котлована (карьера), достаточно с помощью моделирования подобрать такие потенциалы на отдельных участках контура, моделируемых обособленными шинами, при которых потенциалы в пределах площади защищаемого карьера отвечают требуемым уровням на этой площади. Подбор и дальнейший расчет производительности и расстановки скважин проводятся в соответствии с рекомендациями п.п. 7-в и 7-г. При большом числе участков такой подбор затруднителен, а поэтому для расчета контура целесообразно воспользоваться понятием о функции понижения f_c^0 . Определение этой функции от действия выделенных участков контура аналогично определению функции понижения от отдельных скважин (п.5). Дебит и расстановка скважин в пределах расчетного участка контура подбираются, исходя из величины функции понижения для этого участка, равной:

$$f_c^0 = \frac{\bar{U}'}{1-\bar{U}'} \cdot \frac{R_{эп}}{\rho_0} + \frac{\delta}{2\pi B} \ln \frac{\delta}{\pi d_c} \qquad (III.10)$$

(обозначения ясны из рис.56).

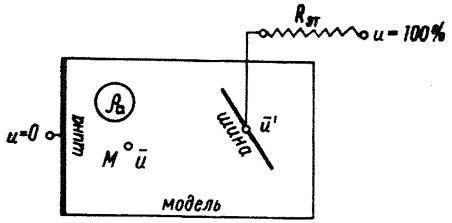


Рис.56. Схема к определению функции понижения от действия участка ряда водопонизительных скважин.

§ 2. Моделирование неустановившейся фильтрации к вертикальным дренажным скважинам [x)]

1. Сеточная модель со скважинами для расчета неустановившейся фильтрации отличается от модели, применяемой при расчете установившейся фильтрации, только наличием временных сопротивлений. В блоках, содержащих скважины, временные сопротивления присоединяются к узловым точкам параллельно с дополнительными сопротивлениями R_{∇_0}, учитывающими осесимметричный характер фильтрации и радиус скважины (формулы III.2-III.3), и с дополнительными сопротивлениями R_{∇}, с помощью которых моделируются скважины, работающие с заданным расходом (§ 1).

Величины временных сопротивлений определяются по формулам (1.31)- (1.35), в зависимости от вида выбранной потенциальной функции.

2. Особенность моделирования в случае скважин с заданным расходом заключается в том, что перепад потенциалов на концах дополнительных сопротивлений R_{∇} подбирается на каждый шаг по времени. Регулировка силы тока при моделировании источников-стоков с заданным расходом производится для каждого шага по времени пос-

x) Общие вопросы моделирования неустановившейся фильтрации изложены в гл.I § 5 и гл.II § 2.

ле задания на вершинах временных сопротивлений потенциалов, полученных в узловых точках на предыдущий шаг по времени. Потенциалы в узловых точках снимаются после подбора на сопротивлении R_y перепада потенциалов, отвечающего заданному расходу источника-стока, или после подбора сопротивления R_y, отвечающего заданному расходу.

3. При моделировании скважин с заданным понижением их расход определяется по замерам силы тока, протекающего через сопротивления R_0.

4. В частном случае осесимметричной фильтрации (одиночная скважина в неограниченном или круговом пласте) моделирование ведется на цепочке сопротивлений, величины которых определяются согласно формулам (1.11)-(1.14) для R_i и формулам (1.31), (1.32) и (1.35) для R_t. При этом область фильтрации делится на ряд кольцевых зон.

5. Особенность моделирования неустановившейся фильтрации к контурным системам на сеточных моделях заключается в том, что дополнительное сопротивление $R_{конт.}\Delta x$ (формулы Ш.6 и Ш.7) может быть введено в модель лишь при соблюдении условия /7/:

$$t > 0,15\frac{\delta^2}{a}, \qquad (Ш.11)$$

где время t отсчитывается от момента включения скважин.

6. Для приближенного расчета неустановившейся фильтрации к контурным системам скважин, работающим как при заданном дебите, так и при заданном понижении, может применяться принцип недеформируемости линий тока (раздел Ш, гл.У, § 4). В этом случае строится сетка движения установившегося потока к контурной системе, выделяются расчетные ленты тока, включающие участки дренажного контура, и производится моделирование по модифицированной схеме Либмана (гл.II, § 2, п.Б). На участке контура скважин потенциал, соответствующий заданному уровню в скважинах, подается при этом через дополнительное сопротивление $R_{конт}$ (формула Ш.5). При заданных расходах через сопротивления $R_{конт.}$ и R_y "отбирается" ток

определенной силы, пропорциональный расходу скважин в пределах участка (§ 1).

§ 3. Моделирование горизонтальных дрен

Расчет установившейся фильтрации при действии горизонтальных дрен типа дренажных штреков, горизонтальных скважин, дренажных траншей и т.п., осуществляется, в основном, по методике, изложенной в гл.II § 1. Поэтому в настоящем параграфе отмечаются лишь некоторые особенности моделирования.

1. Учет несовершенства

Учет несовершенства особенно важен для выработок, частично вскрывающих слои слабопроницаемых пород, подстилаемых более проницаемыми и водообильными пластами.

а. При моделировании плановой фильтрации учет несовершенства выработки достигается путем введения в модель дополнительного электрического сопротивления, пропорционального фильтрационному сопротивлению под дном выработки (гл.II, § 2, п.9). Электрический потенциал, отвечающий отметке дна выработки (или уровню воды в ней), подается на шину, воспроизводящую контур выработки, через это дополнительное сопротивление.

б. При моделировании плановой фильтрации учет несовершенства дренажных выработок можно также осуществить, подавая на контур этих выработок электрический потенциал, отвечающий фиктивному напору ($H_ф$) или уровню ($h_ф$), величина которых вычисляется по формулам (III.11)-(III.12) раздела III. Такой прием исключает необходимость введения в модель дополнительных сопротивлений.

в. При решении профильных двумерных задач несовершенство учитывается самой моделью. При этом на сеточных моделях разбивка области фильтрации на прямо-

угольные блоки осуществляется таким образом, чтобы в непосредственной близости от дрены размеры блоков были наименьшими и чтобы ниже дна дрены находился один или несколько рядов блоков. Для удобства работы нижнюю границу верхнего ряда блоков желательно проводить на уровне дна несовершенной дрены.

2. Учет "нависания" над горизонтальной дреной

При решении инженерных задач, связанных с оценкой эффективности работы горизонтальных дрен в условиях неустановившейся фильтрации, может возникнуть необходимость в учете "нависания" над дреной и его изменения во времени. В этих случаях целесообразно производить расчеты путем моделирования двумерных профильных задач по разрезам, перпендикулярным к направлению дрены.

а. Двумерный в разрезе поток моделируется с помощью сетки сопротивлений R_i с временными сопротивлениями, составленной по принципам, изложенным в гл.1 § 5 п.А-10. Учет неоднородности безнапорного потока в разрезе производится в процессе моделирования одновременным изменением от шага к шагу сопротивлений R_x, R_z и R_t в связи с тем, что на различные моменты меняется глубина потока и депрессионная поверхность пересекает породы с различной величиной проницаемости и водоотдачи. При моделировании часто встречающегося случая двухслойной среды фильтрационным сопротивлением верхней зоны в вертикальном направлении можно пренебречь, если выполняется условие /8/:

$$\frac{R_t}{R_z} \geqslant 4, \qquad (Ш.12)$$

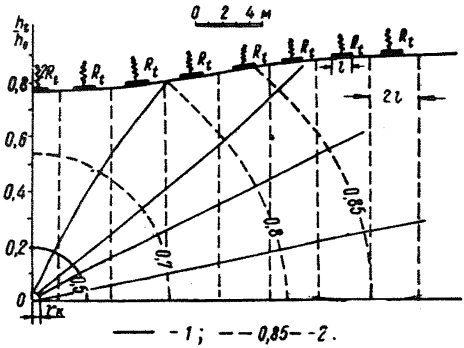
где R_z – электрическое сопротивление, пропорциональное фильтрационному сопротивлению верхнего слоя в вертикальном направлении.

б. Моделирование таких задач можно производить также на комбинированной модели, состоящей из электропроводной бумаги и цепочки переменных сопротивлений. Из

электропроводной бумаги изготовляется модель участка области фильтрации, прилегающего к дренажной выработке; размеры участка должны быть не менее $(2\div3)h_0$, где h_0 – первоначальная мощность потока – при однородном строении фильтрующей толщи; для неоднородных толщ размеры участка двухмерной фильтрации могут быть и большими. Удаленные от выработки участки потока подземных вод, где фильтрация может рассматриваться как одномерная, целесообразно моделировать цепочкой переменных сопротивлений, величину которых можно изменять в процессе моделирования пропорционально глубине потока. Масштаб сопротивлений для обеих частей модели должен быть одинаковым.

в. Моделирование профильных задач неустановившейся фильтрации на бумажных моделях выполняется в следующей последовательности:

– бумажная профильная модель делится вспомогательными вертикальными линиями на ряд фрагментов, к верхней части которых прикрепляются плоские шины – зажимы длиной l, при ширине фрагментов $2l$ (гл.1, § 4, п.2–а); к шинам присоединяются временные сопротивления, величина которых вычисляется по формуле (1.31), где $F = 2l$ (рис.57);



1–Линии тока, 2–эквипотенциали

Рис.57. Сетка движения двумерного потока вблизи области стока (штрека) при моделировании сработки статических запасов с учетом нависания.

– на временные сопротивления подаются потенциалы, отвечающие напорам в пределах выделенных фрагментов;

– в процессе моделирования производится подрезка верхнего края модели от шага к шагу по времени, причем высота каждого из фрагментов должна, в конечном итоге, соответствовать глубине потока в этом сечении на расчетный момент времени t_i (определяется электрическим потенциалом на шине-зажиме), при потенциале на вершине временного сопротивления, отвечающем глубине потока в пределах расчетного фрагмента на момент времени $t_i - \Delta t$; подрезку модели следует производить постепенно (2-3 раза на каждый шаг по времени), причем полезно на модели провести ряд вспомогательных горизонтальных линий, отвечающих величинам электрических потенциалов (см.также гл.II, § 1, п.8в);

– для определения притоков к дренажным выработкам на профильной бумажной модели строится сетка движения (эквипотенциали и линии тока) на расчетный момент времени t_i (при наличии потенциалов на вершинах временных сопротивлений); определение притоков в этом случае необходимо производить по лентам тока (рис.57) с последующим суммированием;

– после подбора сопротивлений фрагментов на момент времени t_i потенциалы, полученные на шинах-зажимах, подаются на вершины временных сопротивлений для получения параметров потока на момент времени $t_i + \Delta t$ и т.д.

Пример моделирования задачи о притоке к горизонтальной скважине приведен в приложении № 7.

ГЛАВА 1У

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ

§ 1. Учет инфильтрационного питания

А. На электроинтеграторах

1. Во всех случаях, когда при моделировании ставится задача учета инфильтрации, в качестве потенциальной функции целесообразно применять $\varphi = H$.

2. При необходимости учета инфильтрационного питания, не изменяющегося в процессе осушения карьерного поля, целесообразно использовать принцип сложения течений /1/, согласно которому моделирование выполняется в следующей последовательности:

а) на модели воспроизводится исследуемая область фильтрации, с учетом действия дренажа. Потенциалы на границах с заданным напором определяются по формуле:

$$U_i = \frac{S_i - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} , \qquad (1У.1)$$

где S_i - величина понижения в расчетной точке границы,

S_{max} - максимальная величина понижения на модели,

S_{min} - минимальная величина понижения. Таким образом, на границах с максимальным уровнем задается минимальный потенциал, на границах с минимальным уровнем - максимальный потенциал;

б) обычным способом строятся линии равных потенциалов, представляющие собой изолинии относительных понижений. Абсолютная величина понижения в любой точке модели будет равна:

$$S_i = U_i (S_{max} - S_{min}) + S_{min}; \qquad (1У.2)$$

в) полученные в результате моделирования изолинии равных понижений при действии дренажа накладываются на карту гидроизопьез (гидроизогипс) естественного потока. В местах пересечений изолиний естественного и дополнительного потоков производится определение напоров результирующего потока подземных вод с учетом инфильтрационного питания (путем вычитания величины понижений S_i из величины напоров $H_{\ell i}$ или уровней $h_{\ell i}$ естественного потока).

Такая методика исключает необходимость предварительного определения величины инфильтрации в явном виде, так как она учитывается в мощности естественного потока подземных вод. Учет инфильтрации этим способом можно осуществлять для потоков с постоянной проводимостью, в частности, для наиболее часто встречающегося на практике случая грунтового водоносного горизонта двухслойного сложения, когда сверху залегает слой слабопроницаемых пород.

3. Если известна величина инфильтрационного питания w_0, то ее можно учесть на модели при задании сосредоточенных источников постоянной интенсивности.

а. Поле фильтрации предварительно разбивается по квадратной сетке на участки площадью F, и равномерная инфильтрация в пределах каждого участка моделируется на плановой модели в виде сосредоточенного источника с помощью дополнительного сопротивления R_{w_0}, вычисляемого по формуле:

$$R_{w_0} = \frac{\Delta U \cdot m\varphi}{w_0 F m\varphi}, \qquad (1У.3)$$

где ΔU – назначаемая заранее разность потенциалов на концах сопротивлений R_{w_0}

б. Аналогично проводится моделирование профильных задач с учетом инфильтрационного питания; оно сопровождается разбивкой исследуемой области на ряд участков длиною $2l$, снабженных шинами. Ток подается на шины дли-

ною l через дополнительное сопротивление R_{w_0}, величина которого вычисляется по формуле (1У,3), в которой $F = 2l$.

в. Для задания разности потенциалов, обеспечивающей подачу тока необходимой силы в узловые точки, удобно использовать дополнительный источник постоянного тока с напряжением, в несколько раз превышающим напряжение на сеточном электроинтеграторе. В этом случае используется вся шкала делителя напряжения и не требуется корректировка сопротивлений для задания инфильтрационного питания, так как изменение потенциалов на депрессионной кривой не будет практически влиять на величину инфильтрации / 1 /.

4. При необходимости учета одновременно дополнительной инфильтрации известной интенсивности и естественной инфильтрации, величина которой в явном виде неизвестна, следует, в первую очередь, определить уровни с учетом только естественной инфильтрации (п.2); полученные уровни являются исходными для составления модели, предназначенной для учета дополнительной инфильтрации (п.3). На эту модель, предварительно разбитую по сетке на ряд участков, через сопротивления R_{w_0} подается ток, пропорциональный дополнительному инфильтрационному питанию.

Эту же задачу можно решить с помощью введения фиктивных водопроводимостей методом сложения течений /6,1/.

5. При моделировании неустановившейся фильтрации учет естественного инфильтрационного питания осуществляется автоматически, при отсчете понижений от уровней естественного потока. Потенциалы, отвечающие уровням естественного потока, подаются на вершины временных сопротивлений при выполнении первого шага по времени.

Если известна величина дополнительной инфильтрации $w_д$, то она учитывается путем прибавления на каждом шаге по времени к величинам потенциалов, подаваемых на временные сопротивления, величины $\Delta U_{w_д}$, равной /11/:

$$\Delta U_{w_д} = \frac{w_д}{\mu \cdot m_ф} \Delta t \qquad (1У.4)$$

Этот же прием может быть применен и в случае, когда в процессе моделирования учитывается изменение проводимости потока (например, за счет изменения его мощности).

Б. На гидроинтеграторе

1. В условиях двумерных профильных и пространственных задач воспроизведение инфильтрационного питания осуществляется приливанием в основные сосуды, моделирующие верхний ряд блоков. С учетом выбранных масштабов времени (m_t) и напоров (m_h) (табл.14) увеличению мощности обводненного пласта в естественных условиях будет соответствовать скорость изменения столба воды в сосудах гидроинтегратора, равная

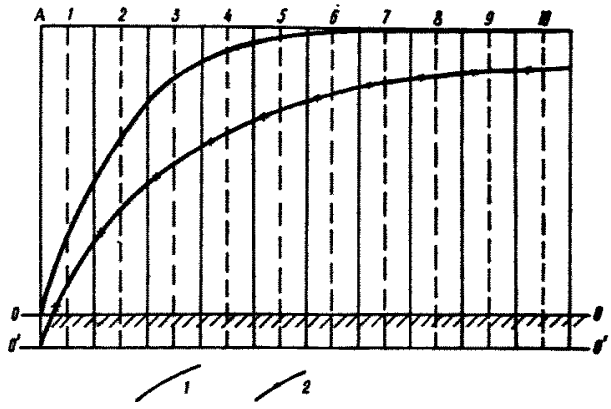
$$v_\theta = \frac{w_0}{\mu} \cdot \frac{m_t}{m_h}, \qquad (1У.5)$$

где w_0 - интенсивность инфильтрационного питания.

2. Моделирование инфильтрации на гидроинтеграторе может быть произведено тремя способами.

а. Моделирование путем изменения плоскости сравнения.

Моделирование инфильтрации при этом способе осуществляется путем опускания подвижного сосуда на стойке граничных условий, уровень воды в котором воспроизводит уровень воды в дрене, с интенсивностью v_0 , определяемой по выражению (1У.5). Для этого на барабане установки граничных условий укрепляется график снижения подвижного сосуда во времени, выполненный в масштабе 1:2 по отношению к действительной скорости его снижения. Отсчет напоров воды в основных сосудах производится каждый раз от новой плоскости сравнения, которая соответствует новому положению подвижного сосуда (рис.58). Решение задачи на приборе при этом производится обязательно с применением часового механизма, который приводит во вращение барабан установки граничных условий и включается одновременно с пуском гидроинтегратора. Измене-



1.Исходная депрессионная кривая при начальной плоскости сравнения 0 - 0.

2.Положение кривой депрессии при новой плоскости сравнения 0 - 0.

Рис.58. Схема моделирования инфильтрации путем изменения плоскости сравнения.

ние во времени граничных условий осуществляется при обводке графика на барабане оператором или автоматически, при помощи следящей системы. Время работ на приборе отсчитывается на горизонтальной оси того же графика; при этом поправка на изменение температуры воды вводится посредством перемещения груза на маятнике часового механизма, в соответствии с нанесенной на нем температурной шкалой.

Моделирование инфильтрации этим способом может осуществляться при постоянном уровне воды в дрене и равномерной инфильтрации, причем изменение плоскости сравнения учитывается только в сосудах, моделирующих верхний ряд блоков.

б. Моделирование путем сосредоточенного приливания воды в основные сосуды.

Сущность этого способа моделирования инфильтрации поясним на следующем примере. Пусть депрессионная кривая 1-1 на рис.59 является исходной кривой для моделирования определенного этапа дренажа. В середине расчетного интервала времени осуществляется остановка прибора (кривая П-П на рис.59). Затем через устройство для задания начальных условий в каждый узел основных сосудов произ-

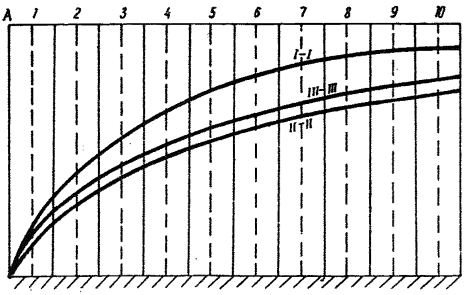


Рис.59.

водится приливание такого количества воды, которое соответствует суммарному инфильтрационному питанию горизонта за расчетный интервал времени. Это количество воды равно произведению времени осушения на величину расхода воды, выраженных в масштабах моделирования.

Расход воды определяется по выражению

$$Q' = \upsilon_0 \cdot \omega_i \cdot , \qquad (1У.6)$$

где υ_0 – интенсивность приливания воды, определяемая по зависимости (1У.5);

ω_i – емкость сосуда.

В результате воспроизведения инфильтрации произойдет повсеместно увеличение столбов воды в основных сосудах и кривая депрессии на приборе займет положение Ш–Ш (рис.59). После этого снова включается прибор и продолжается решение задачи до конца расчетного интервала времени.

Моделирование инфильтрации этим способом можно проводить при постоянном и переменном уровнях воды в дрене, при равномерной и неравномерной инфильтрации.

в. Моделирование посредством системы приливания.

При решении задачи на приборе с помощью системы приливания необходимо включить в набор емкостей основных сосудов стеклянные пьезометры. Пороги водосливов, установленные над этими пьезометрами, должны быть выставлены на одном уровне.

Моделирование инфильтрации посредством системы

приливания основано на приливании в каждый основной сосуд необходимого расхода воды, определяемого по формуле (1У.6). При этом принимается постоянная разность напоров между подвижным сосудом и порогом водосливов $\Delta H'$; гидравлические сопротивления на пути движения воды к водосливам определяются по выражению:

$$\rho = \frac{\Delta H'}{Q'} \qquad (1У.7)$$

Присоединение системы приливания к общей гидравлической цепи прибора производится так, чтобы поступление воды из нее в основные сосуды происходило синхронно с пуском гидроинтегратора.

При решении фильтрационных задач, которые характеризуются переходом депрессионной поверхности в процессе дренажа из верхнего ряда блоков в нижние (например, при моделировании процесса осушения в слоистых грунтах), при монтаже гидромодели предусматривается присоединение системы приливания к сосудам, моделирующим как верхний, так и нижележащий ряды блоков. Моделирование инфильтрации описанным способом возможно осуществлять при произвольно изменяющемся уровне воды в дрене, при равномерной и неравномерной инфильтрации.

2. Учет перетекания

1. Моделирование может осуществляться на "двухэтажной" плановой модели, отвечающей двум взаимодействующим водоносным горизонтам. В пределах каждого "этажа" площадь фильтрации предварительно разбивается по сетке на элементарные участки. Центры соответствующих участков моделей рассматриваемых пластов, выполненных в одних масштабах, соединяются дополнительными сопротивлениями, величины которых вычисляются по формуле:

$$R_п = \frac{m_в}{m_ф \cdot k_в \cdot F}, \qquad (1У.8)$$

где $m_в, k_в$ – мощность и проницаемость водоупора,
F – площадь элементарного участка пласта.

При таком моделировании можно учесть различную проницаемость водоупоров в плане, в том числе – и наличие "окон".

2. Если верхний из взаимосвязанных горизонтов является безнапорным, моделирование несколько осложняется. В этом случае можно рекомендовать следующий прием:

а) определяются глубины верхнего (безнапорного) потока без учета его взаимосвязи с нижним (напорным), причем при моделировании учитываются положение границ безнапорного горизонта, характер его питания и разгрузки (кроме перетекания); в результате моделирования создается неоднородная электрическая модель с учетом изменения проводимости безнапорного горизонта в плане;

б) неоднородная электрическая модель безнапорного горизонта соединяется через сопротивления $R_п$ с моделью нижележащего напорного горизонта, и проводится моделирование при учете перетекания. Электрический потенциал в данном случае пропорционален величине пьезометрического напора ($\varphi = H$).

Этот прием допустим при условии, что проводимость верхнего горизонта значительно выше, чем нижнего, т.е. изменение уровня в верхнем горизонте за счет перетекания незначительно. В противном случае необходима корректировка модели верхнего горизонта за счет изменения его проводимости по результатам, полученным с применением профильных моделей, и повторное моделирование в плане.

3. При решении профильных задач перетекание автоматически учитывается на модели, составленной исходя из соотношений проводимости отдельных слоев. При этом целесообразно прибегать к искажению масштабов (гл.II, § 1, п.8,д).

§ 3. Учет уклона водоупора при безнапорной фильтрации

1. В общем случае учет уклона водоупора на профильных и плановых моделях производится путем подбора сопротивлений отдельных частей моделей, отвечающих мощности (глубине) соответствующих участков потока. Потенциальной функцией в этом случае служит величина напора H. При моделировании неустановившейся фильтрации подбор сопротивлений сетки R_i проводится для каждого шага по времени; подбор продолжается до тех пор, пока потенциалы в узловых точках модели не будут соответствовать глубине потока в этих точках (см.гл.II, § 2, п.А,3). Временные сопротивления рассчитываются по формуле (1.31) при замене в ней величины F на $F \cdot \cos\alpha$ (α - угол наклона водоупора).

При решении задач установившейся фильтрации на профильных бумажных моделях учет уклона водоупора осуществляется "автоматически" при подборе положения депрессионной кривой (гл.II § 1 п.8в).

2. При решении плановых задач уклон водоупора учитывается проще всего путем создания модели поля фильтрации условного напорного горизонта с проводимостью T изменяющейся по экспоненциальному закону /12/:

$$T = B \cdot e^{\frac{i}{h_{ср}} \cdot x}, \qquad (IУ.9)$$

где i - уклон водоупора (направление уклона совпадает с одной из выбранных координатных осей, например $0X$),

B - произвольная постоянная, назначаемая, исходя из удобства моделирования (величина B отвечает проводимости горизонта в сечении $X=0$;

$h_{ср}$ - средняя глубина безнапорного потока (разд.III, гл.1, § 3).

Электрические потенциалы, задаваемые на границах модели и снимаемые с модели в процессе моделирования, соответствуют при этом величинам $\frac{h^2}{2}$, где h - глу-

бина безнапорного потока.

При необходимости, можно сделать второе приближение, перестроив модель согласно величине $h_{ср}$, уточненной по данным первого приближения, причем эта величина может приниматься различной для каждого сечения $\gamma = const$.

3. При решении большинства практических задач плановой неустановившейся фильтрации можно использовать упрощенную схему моделирования, основанную на принципе недеформируемых лент тока. Для этого строится модель согласно п.п.1,2, и на ней выделяются расчетные ленты тока, а дальнейшее моделирование производится по одномерной схеме Либмана на цепочке переменных сопротивлений (см.также гл.П § 2 п.Б). Временные сопротивления рассчитываются по формуле (П.8), при замене в ней величины $(v_1^0 + v_2^0)^2$ на $(v_1^0 + v_2^0)^2 \cos\alpha$.

4. При истощении водоносного горизонта в условиях наклонного водоупора может возникнуть необходимость учета перемещения границы обводненности пласта (рис.60).

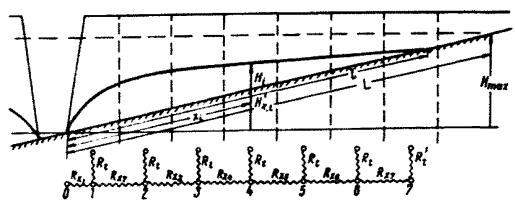


Рис.60. Схема модели безнапорного потока с наклонным водоупором.

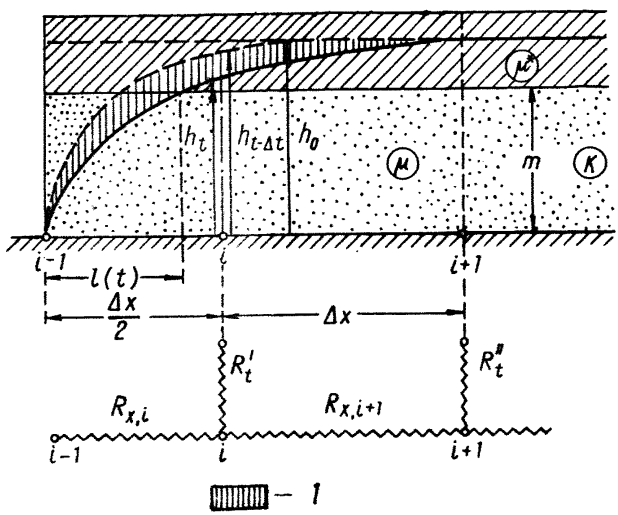
Учет продвижения границы производится путем изменения величины временного сопротивления R'_t в граничном блоке пропорционально уменьшению его площади; изменение крайнего сопротивления осуществляется не только пропорционально глубине потока, но и пропорционально расстоянию от предпоследней узловой точки до подвижной границы, находящейся в пределах крайнего блока. По мере перемещения границы в пределах крайнего блока, величина временного сопротивления R'_t увеличивается из-за уменьшения площади блока до тех пор, пока подвижная граница не перейдет в предпоследний блок, после чего сопротивление отключается.

§ 4. Учет напорно-безнапорного режима фильтрации

1. При моделировании напорно-безнапорной неустановившейся фильтрации учет движения границы раздела напорной и безнапорной зон производится в процессе моделирования путем изменения величин как электрических сопротивлений по координатным осям, так и временных сопротивлений.

2. В безнапорной зоне потока электрические сопротивления рассчитываются пропорционально глубинам $h_{ср}$, в напорной зоне - пропорционально мощности m (потенциальная функция $\varphi = H$).

Величины временных сопротивлений R''_t в напорной зоне (рис.61) рассчитываются исходя из упругой водоотда-



1 - зона, осушенная за период времени от $t-\Delta t$ до t.

Рис.61. Схема к расчету напорно-безнапорной фильтрации.

чи напорного водоносного пласта μ^* ; в безнапорной зоне

величины временных сопротивлений R'_t вычисляются, исходя из водоотдачи пород нижнего слоя μ (рис.61).

В процессе моделирования замена временных сопротивлений R''_t на R'_t производится по мере перемещения границы раздела напорной и безнапорной зон.

3. В том случае, когда за интервал времени Δt в расчетном блоке происходит изменение режима (напорный режим сменяется безнапорным), необходимо уточнить величину средней водоотдачи в пределах блока в период времени от $t - \Delta t$ до t ; она вычисляется, исходя из объема пород нижнего и верхнего слоев, заключенного между депрессионными поверхностями на моменты времени $t - \Delta t$ и t . Уточнение средней водоотдачи осуществляется путем последовательных приближений (как правило, достаточно двух-трех приближений на каждый шаг по времени). Подбор усредненной водоотдачи обычно имеет смысл лишь для ранних стадий неустановившейся фильтрации, при значительной скорости движения границы раздела двух зон.

ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ 1У

1. Бочевер Ф.М., Гармонов Н.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. - Основы гидрогеологических расчетов. М., "Недра", 1965.

2. Вевиаровская М.А., Кравченко И.П., Румянцев С.А. - Методы аналогий применительно к фильтрационным расчетам. Изд.МГУ, 1962.

3. Дружинин Н.И. - Изучение региональных потоков подземных вод методом электродинамических аналогий. М., "Недра", 1966.

4. Карплюс У. - Моделирующие устройства для решения задач теории поля. ИЛ., 1962.

5. Либман Д. - Новый метод электрической аналогии для решения нестационарных задач теплопроводности. Сб.переводов "Механика", № 3, 1957.

6. Лялько В.И., Шнейдерман Г.А. - Формирование и прогноз ресурсов подземных вод засушливых районов."Наукова думка", 1965.

7. Нумеров С.Н. - О неустановившейся фильтрации в полосообразном пласте к прямолинейной цепочке совершенных скважин. Известия АН СССР, ОТН № 1, 1958.

8. Павловская Л.Н., Федорова В.В. - Некоторые вопросы моделирования неустановившейся фильтрации грунтовых вод в двуслойной среде на электрических сетках активных сопротивлений. Известия ВНИИГ, № 76, 1965.

9. Тетельбаум И.М. - Электрическое моделирование. М., Физматгиз, 1959.

10. Фильчаков П.Ф. - Теория фильтрации под гидротехническими сооружениями, том 2.АН УССР,1960.

11. Шестаков В.М. - Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. Изд.МГУ, 1965.

12. Hantush M. "J.Hydraul.Division", vol.89, Nr 1, 1963.

ПРИЛОЖЕНИЯ К РАЗДЕЛАМ Ш и 1У

П Р И Л О Ж Е Н И Е 1

(пример расчета)

Требуется определить притоки к участку карьера, расположенного у реки, на различные моменты времени. Ближайшее расстояние от карьера до реки $R_{\partial\beta}$ =500 м; k= 10 м/сут; μ =0,28; глубина потока на контуре реки h_1 =50 м, на контуре карьера - h_2 =0, t_i =180 сут., 720 сут., 1800сут. Определить уровень в точке, удаленной от карьера на расстояние x =700 м, на момент времени t =720 сут.

Расчет ведем в соответствии с разд.Ш, гл.1У, § 4, п.А2.

1. Строим на модели ЭГДА сетку движения при установившемся режиме и выделяем расчетные ленты тока. Одна из таких лент показана на рис.62; ее параметры: $L=R_{\partial\Pi}$= =2500 м, $B_к$ =550 м. На этом же чертеже показаны гидроизогипсы естественного (до начала работы карьера) потока.

2. Определяем время t_{0min}, при котором практически начинает сказываться влияние реки на величины притоков в карьер. Для этого сначала вычислим коэффициент уровнепроводности a (разд.Ш, гл.1, § 3, п. 2 а):

$$h_{ср} = \frac{1}{4}(47{,}5 + 2\cdot 50) = 37 \text{ м};$$

$$a = \frac{10 \cdot 37}{0{,}28} = 1320 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

Определяем $t_{0\,min} = \frac{R^2_{\partial min}}{\pi a} = \frac{500 \cdot 500}{3{,}14 \cdot 1320} = 60$ суток.

Таким образом, по условиям задачи расчеты надо провести при $t > t_{0min}$=60 сут.

3. Определяем время $t_п = \frac{R^2_{\partial\Pi}}{\pi a}$, в течение которого условная воронка депрессии дойдет до реки (в пределах ленты):

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

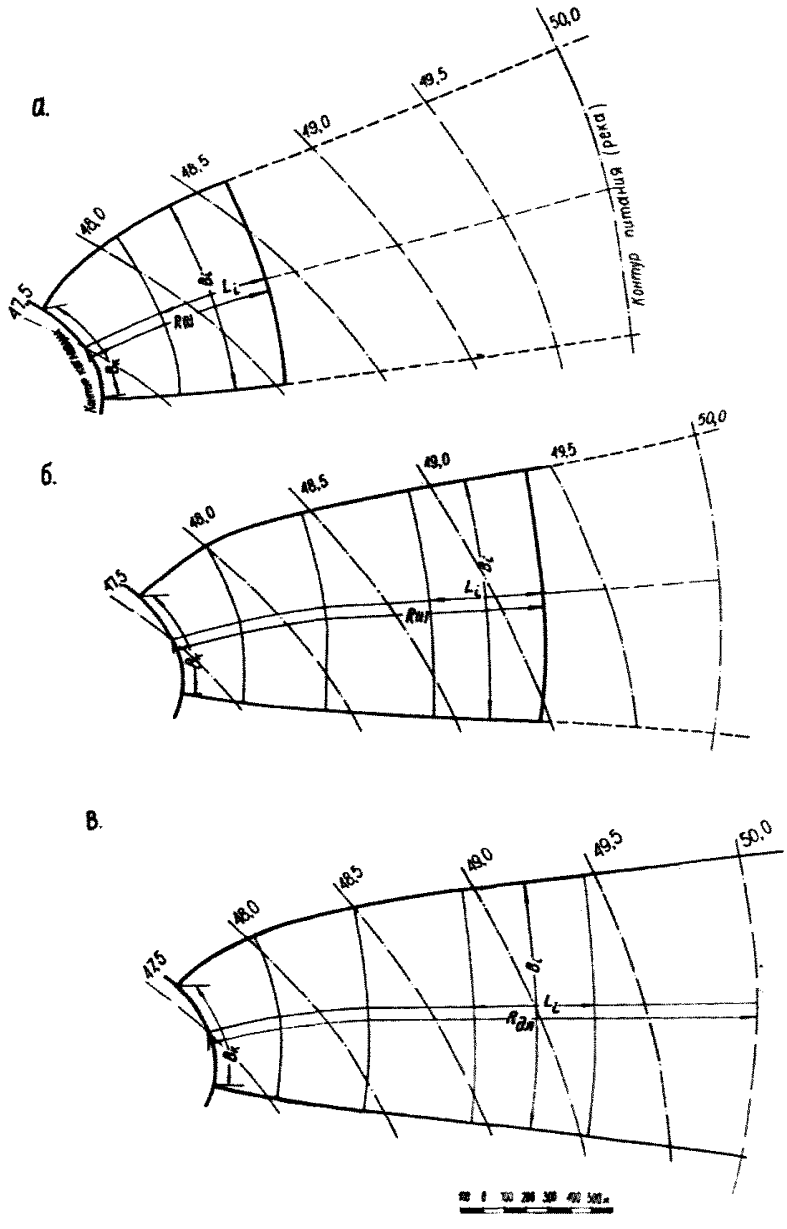


Рис.62. Схема к расчету притоков к участку карьера методом "недеформируемых линий тока."

4. В пределах выделенной ленты тока определяем положение условного контура питания на момент времени t_i =180 сут. По формуле (П.6, разд.Ш): $R(t)=\sqrt{3,14.1320.180}$ = 860 м.

5. Выделенный участок планового потока на момент времени t_1 =180 сут. приводим к плоскому по формуле (П.1,разд.Ш): L_{pi} =2. $\frac{550}{1,82}$=605 м

6. Удельный приток к участку карьера в момент времени t_1 =180 сут. вычисляем по формуле (П.3, разд.Ш), где $(x_1-x_2)=L_{pi}$; a $h_{(x_i)}$- естественная глубина потока на условном контуре питания, определяемая по "естественным" гидроизогипсам – $h_{(x)}$=48,36 м ;

$$q_1 = \frac{10.(48,36)^2}{2.605} = 19,4 \text{ м}^3/\text{сут. на 1 пог.м.}$$

7. Аналогично проводим расчет на момент времени t_2 =720 сут. При этом получаем: $R_{(t)}$=1720 м, h_1 =49,20 м, L_{pi} =1050 м, q_2 =11,5 $м^3$/сут. на 1 пог.м.

8. Расход в пределах ленты тока при t_3 =1800 сут. можно рассчитать, как для установившегося режима, приводя ленту длиной $R_{дл}$=2500 м к плоской, с расчетной длиной $L_p = \frac{5,550}{2,02}$ = 1370 м:

$$q_3 = \frac{10,50^2}{2.1370} = 9,1 \text{ м}^3/\text{сут. на пог.м.}$$

9. Расчет уровня в точке X, расположенной в 700 м от карьера, на момент времени t_2 =720 сут. проводится в соответствии с § 4 п.А.6, гл.1У, разд.Ш:

а) определяем расчетное расстояние от карьера до точки x по формуле (П.1, разд.Ш) при установившемся движении: Xp=2 . $\frac{550}{2,02}$=545 м;

б) определяем глубину в расчетной точке при установившемся движении (на модели): h_y = 31,4 м;

в) определяем установившуюся глубину h_{y0} в рас-

четной точке по формуле (П.3, разд.Ш):

$$h_{y0}=\sqrt{x\cdot\frac{h_1^2}{L}}=\sqrt{700\cdot\frac{50^2}{2500}}=26{,}4\ \text{м};$$

г) определяем глубину h_{t0} в расчетной точке на момент времени t_1 =720 сут., как для плоскопараллельного движения, по формуле (1У.15,разд.Ш):

$$h_{t0}=\sqrt{48{,}2^2-47{,}5^2\left[1-0{,}28-S\,(0{,}15;\ 0{,}28)\right]}=31{,}3\ \text{м};$$

д) глубина h_x в расчетной точке на момент времени t_1 = 720 сут:

$$h_x=\sqrt{48{,}2^2-(48{,}2^2-31{,}4^2)\ \frac{48{,}2^2-31{,}3^2}{48.2^2-26{,}4^2}}=34{,}9\ \text{м}$$

П Р И Л О Ж Е Н И Е 2

(пример расчета)

Определить удельный приток (на 1 пог.м откоса) к рабочему борту карьера, с учетом скорости перемещения его фронта. Исходные данные:

k = 3 м/сут; a =60 м^2/сут; h_1 =3 м; h_2 = 0; v =0,3 м/сут; L =500 м; ΔL =20 м; t_i =100 сут; Δt = 20 сут.

Расчет ведется в соответствии с гл.1У, § 5 п. Б, разд.Ш.

1. Определяем величину $t_0=\dfrac{v^2 t_i}{2a}$

$$t_0=\frac{0{,}3^2\cdot 100}{2{,}60}=0{,}75\ ;$$

в зависимости от этой величины находим величину l_0 по графику (рис.22) – l_0 = 0,94.

2. Проверим соблюдение условия $\dfrac{2a\,l_0}{v}+v\,t_i<L$, при котором применима расчетная формула (1У.25, разд.Ш):

$$\frac{2{,}60}{0{,}3}+0{,}3\cdot 100=430\ \text{м}<500\ \text{м}.$$

3. Рассчитываем приток к откосу по формуле (1У.25, разд.Ш):

$$q = \frac{3\,(3^2 - 0)}{2.60.0.94} \cdot 0{,}3 = 0{,}071 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

4. Определяем глубину в точке $x=\Delta L$ по формуле (П.3, разд.Ш):

$$h(t_i, \Delta L) = \sqrt{\frac{0{,}071.2.20}{3}} = 0{,}97 \text{ м}$$

5. Определяем максимальные притоки к откосу после очередной заходки экскаватора по формулам (1У.28-1У.29, разд.Ш):

$$q_{(t_i+\Delta t)} = 0{,}071 + \frac{3.0{,}97^2}{\sqrt{3{,}14.60.20}} = 0{,}117 \text{ м}^3/\text{сут. на 1 пог.м.}$$

6. Приток, подсчитанный без учета движения борта, составит, согласно формуле (П.3,разд.Ш):

$$q' = \frac{3\,(3^2 - 0)}{2\,(0{,}3.100+20)} = 0{,}029 \text{ м}^3/\text{сут.на 1 пог.м.}$$

П Р И Л О Ж Е Н И Е 3

(пример расчета)

Определить требуемое число скважин на участке контурного дренажа карьера. Рассчитать уровень в точке М (рис.63) и построить депрессионную кривую по линии скважин. Исходные данные:

k = 10 м/сут; h_1=50 м, h_2=0, h_c=0, d_{50}=0,25 мм,

$\rho = 34^\circ$, d_c=0,3 м, $B_к$ =550 м; $B_р$ =880 м;

l_1 =2000 м; l_2 =500 м, $x_м$ =220 м, L =2500 м;

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

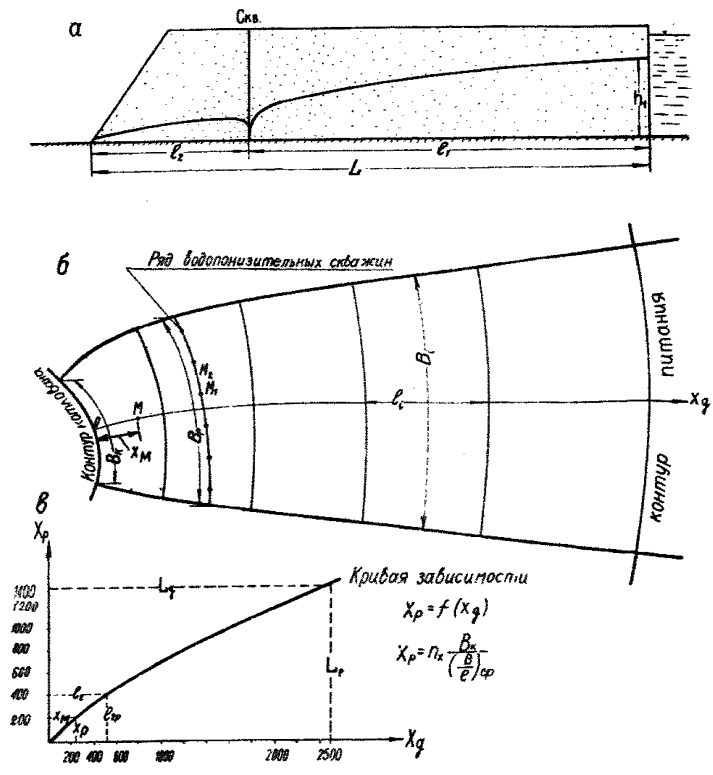


Рис.63. Схема к расчету ряда водопонизительных скважин вблизи карьера.

Предварительно для решения задачи построена сетка движения и выделены характерные ленты тока, одна из которых показана на рис.63. В пределах этой ленты тока располагается участок дренажного контура, расчет которого производится следующим образом (разд.Ш, гл.1 § 5 и гл.У § 2, п.Б.3)

1. Выделенную ленту тока приводим к плоской по формуле (П.1,разд.Ш) посредством введения расчетной

длины пути фильтрации:

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

и строим кривую зависимости расчетных длин пути фильтрации от действительных длин (рис.63). Пользуясь этой кривой, находим расчетные величины l_{2p} =400 м, l_{1p} = 970 м и x_p =200 м, отвечающие действительным величинам l_2, l_1 и $x_м$.

2. Определяем расход потока q_0^0 , выходящего на откос, допустимый с точки зрения фильтрационных деформаций. Для этого воспользуемся методикой В.М.Шестакова (разд.1, приложение 2) и построим график зависимости оплывания от выходного расхода q_0 . С этой целью задаемся несколькими произвольными значениями q_0 . Пусть q_{01}= 2 м^3/сут. на 1 пог.м. Пользуясь графиком (приложение 2, разд.1), определяем величину χ в зависимости от $\lambda = \frac{\sqrt[3]{2}}{0{,}025} = 50{,}4$; получаем

χ = 0,49. Средний уклон зоны оплывания $J_{ср}$=0,49.$\times \frac{tg\ 34^\circ}{2}$=0,165

Затем рассчитываем величину условного заложения откоса:

$$m = \frac{5}{tg\ 34^\circ + 3.0{,}165} = 4{,}27$$

и определяем высоту промежутка высачивания по формуле (Ш.14 разд.Ш): $h_b = \frac{2}{10}(4{,}27 + 0{,}5) = 0{,}9$ м. Согласно приложению 2 разд.1, длина языка оплывания при расходе q_{01}= =2 м^3/сут. на 1 пог.м. откоса составляет:

$$l_{опл.} = \frac{4{,}27}{0{,}165} = 5{,}8 \text{ м}$$

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

Строится график связи расхода q_0 и длины языка оплыва-

ния $l_{опл}$ (рис.84). Пользуясь графиком, определяем для заданной допустимой величины оплывания (5 м) допустимый расход выходящего на откос потока

q_0^0 = 1,8 м^3/сут.на 1пог.м.

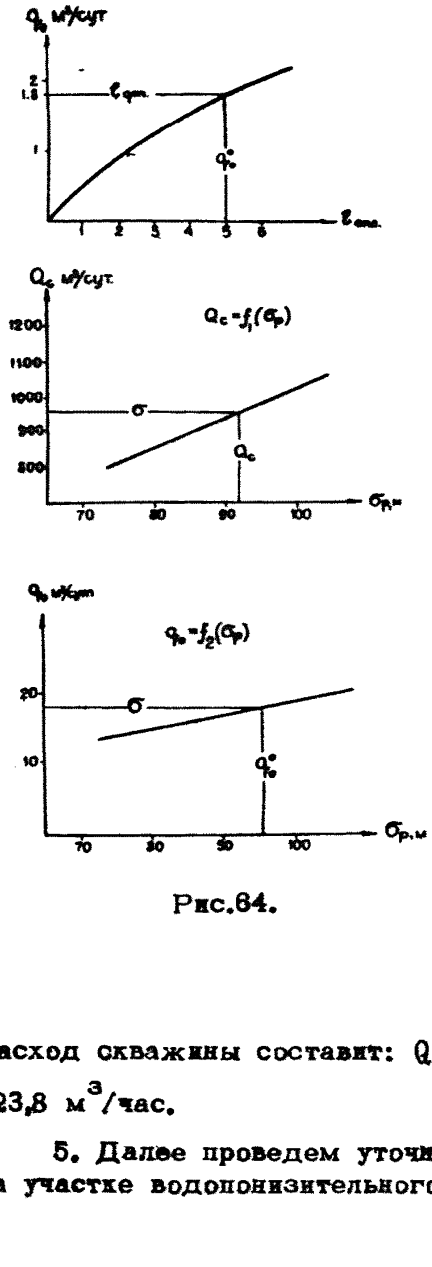


Рис.84.

3. Определяем единичный приток к откосу при отсутствии скважин, для чего используем формулу (П.3, разд.Ш) при $(x_1 - x_2) = L_р$:

$$q = \frac{10,50^2}{2.1370} = 9,1 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

на пог.м.

4. Исходя из требуемого коэффициента заслона (разд.Ш, гл.1,§ 5): $\delta = 1 - \frac{q_0^0}{q_0} = 1 - \frac{1,8}{9,1} = 80,3\%$, по графику (рис.1,разд.Ш), приближенно определяем требуемое расчетное расстояние между скважинами $б_р$, которое при $l_{2р}$ = =400 м составляет 83 м.

Число скважин на участке

$$n_y = \frac{550}{83} = 7 \text{ скв.}$$

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

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

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

Задаваясь величинами $\delta_р$ =75 м, 90 м и 100 м, по формулам (У.21 и У.22, разд.Ш) определим расходы скважин $Q_с$ и расходы потока, выходящего на откос q_0.

При $\delta_р$ =75 м $$Q_с = \frac{10}{2} \cdot \frac{\frac{400}{1370} \quad (50^2)}{\frac{400.970}{75.1370} + 0{,}367 \lg \frac{75}{2.3{,}14.0{,}15}} =$$

= 817 м^3/сут = 34 м^3/час.

$$q_0 = 10. \frac{50^2}{2.1370} - 817 . \frac{970}{75.1370} = 1{,}4 \text{ м}^3\text{/сут.на пог.м.}$$

При $\delta_р$ =90 м $Q_с$=940 м^3/сут.=39,2 м^3/час, q_0 =1,7 м^3/сут. на пог.м.

При $\delta_р$ =100 м $Q_с$= 1020 м^3/сут.=42,5 м^3/час, q_0=1,9 м^3/сут. на пог.м.

По рассчитанным величинам $Q_с$ и q_0, при заданных $\delta_р$, строим графики зависимостей $Q_с = f_1(\delta_р)$ и $q_0 = f_2(\delta_р)$ (рис.64).

Исходя из допустимого значения q_0^0 =1,8 м^3/сут.на пог.м., пользуясь графиком $q_0 = f_2(\delta_р)$, подбираем соответствующее значение $\delta_р$ =95 м, а затем по графику $Q_с = f_1(\delta_р)$ находим $Q_с$ =990 м^3/сут.=41.3 м^3/час (при $\delta_р$ =95 м). Выбираем $Q_н$ =40 м^3/ч .с = 960 м^3/сут. При $Q_с = Q_н$=960 м^3/сут. расчетное расстояние между скважинами составит 92 м. Число скважин на участке в пределах ленты тока шириной $B_к$ = =550 м равно $n_у = \frac{550}{92} \approx 6$ скв. Действительное расстояние между скважинами δ на участке контура длиной 880 м составит $\delta = \frac{880}{6} \approx 146$ м

6. Для обеспечения работы скважины с дебитом $Q_с = Q_н$ необходимо соблюдать условие $Q_н \leq Q_{бз}$ (разд.Ш,гл.Ш,§ 5)

Проверим водозахватную способность скважин в наших условиях, при длине рабочей части фильтра $l_ф$ =10 м.

По формуле (Ш.25, разд.Ш) $v = 65 \sqrt[3]{10}$ =140 м/сут;

$Q_{б3}$=2.3,14.0,15.10.140 = 1320 $м^3$/сут.

Таким образом, требуемое условие соблюдается.

7. Рассчитаем уровень в точке М, расположенной на расстоянии x =220 м от котлована (расчетное расстояние до точки М-$x_р$ =200 м - см.график на рис.63). Для этого заменяем ряд скважин фиктивной сплошной дреной (траншеей) и вводим условную (расчетную) глубину потока (разд.Ш,гл.Ш, § 1):

$$h_ф = \sqrt{\frac{960}{3,14.10} \ln\frac{92}{3,14.0,3}} = 11,5 \text{ м}.$$

Уровень в точке М можно определить из балансового соотношения:

$$\frac{k(h_ф^2 - h_м^2)}{2(l_{2р} - x_р)} = \frac{k(h_ф^2 - h_2^2)}{2l_{2р}},$$

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

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

а) высота высачивания $h_б$ в скважине определяется по формуле (Ш.19, разд.Ш). При $\frac{Q_с}{k} = \frac{960}{10} = 96$ $м^2$ и уровне воды в скважине $h_с$ =0, высота высачивания $h_б$=9 м;

б) уровни в точке $М_1$, удаленной от скважины на расстояние $y_р$=20 м, и в точке $М_2$ - посередине между скважинами - определяются по формуле (Ш.4, разд.Ш):

$$h_{м_1} = \sqrt{11,5^2 - \frac{2.960}{10}\left[-\frac{1}{2\pi}\ln\left(2\sin\frac{\pi \cdot 20}{92}\right)\right]} = 11,8 \text{ м};$$

$$h_{м_2} = \sqrt{11,5^2 - \frac{2.960}{10}(-0,11)} = 12,4 \text{ м}$$

При построении депрессионной кривой расчетные расстояния $y_{1р}$ и $y_{2р}$ точек $М_1$ и $М_2$ от скважины следует пе-

ревести в действительные – y_1 и y_2, исходя из действительного расстояния между скважинами $б$ =146 м, т.е. y_1 = 31,7 м, y_2 =73 м (рис.65).

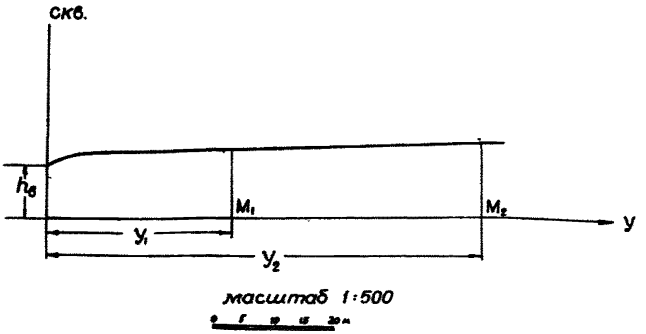


Рис.65. Депрессионная кривая по линии скважин.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

(пример расчета)

Провести расчет понижения от действия линейного ряда водопонижающих скважин, расположенного на расстоянии L =500 м от реки. Скважины закладываются в однородный безнапорный поток (k =10 м/сут, μ =0,15, a =1200 м^2/сут, n =10 скв., $б$ =30 м, r_c =0,15 м, h_0=30 м) и работают с постоянным суммарным расходом $Q_{уст}$=12000 м^3/сут. Требуется найти понижение в точке M (рис.66) через 50 суток после начала работы скважин.

Расчет проводим в соответствии с разд.Ш, гл.У,§ 3, п.А,4.

1. Определяем параметры λ, λ_1 и λ_2:

$$\lambda = \frac{300}{2\sqrt{1200 \cdot 50}} = 0{,}612; \quad \lambda_1 = \frac{200}{300} \times 0{,}612 = 0{,}407,$$

$$\lambda_2 = \frac{100}{300} \cdot 0{,}612 = 0{,}204.$$

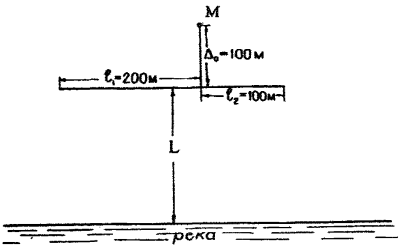


Рис.66. Схема к расчету линейного ряда водопонизительных скважин у реки.

2. По графику (рис.31,разд.Ш) находим значения функций $F\left(\frac{\Delta_0}{l_1};\ \lambda_1\right)$ и $F\left(\frac{\Delta}{l_2},\ \lambda_2\right)$: F (0,5; 0,407) =0,202; F (1; 0,204) =0,25

3. Расчетное расстояние R от середины ряда до области питания определяем по таблице 1 (разд. Ш): $R=2L=1000$ м, тогда $\frac{R^2}{4at} = \frac{1000^2}{4.1200.50} = 4,17$

По таблице 8 (разд.Ш) значение функции $E_i\left(-\frac{R^2}{4at}\right)$ равно $E_i\ (-4,17) = -0,003$

4. Согласно формуле (У.32, разд.Ш):

$$\int_{Kt} = \frac{200}{600}\cdot 0,202 = \frac{100}{600}\ 0,25 + 0,08\ (-0,003) = 0,10876$$

5. Уровень воды в точке M при работе водопонизительного ряда определяем по формуле (У.31, разд.Ш):

$$h = \sqrt{30^2 - \frac{2,12000}{10}\cdot 0,10876} = 25,2\ м$$

Понижение в расчетной точке $M\text{-}S_M = h_0 - h = 30 - 25,2 = 4,8$ м.

6. Определим уровень в скважине ряда по формуле (У.28, разд.Ш), где вместо $\int_{Kt}$ подставляем выражение $\left(\int_{Kt} + \frac{1}{n}\Phi_K\right)$ при $\Delta_0 = r_c$.

Найдем величину Φ_K по номограмме (рис.7, разд.Ш) при $\frac{\delta}{d_c} = \frac{30}{0,3} = 100$; $\Phi_K = 0,542$.

Аналогично п.2 находим значения функций $F\left(\frac{r_c}{l_1},\ \lambda_1\right)$ и $F\left(\frac{r_c}{l_2},\ \lambda\right)$; $F\ \left(\frac{0,15}{200};\ 0,407\right) = 0,262$ и $F\ \left(\frac{0,15}{100};\ 0,204\right) =$

=0,365.

$$f_{кt} = \frac{200}{600} \cdot 0{,}262 = \frac{100}{600} \cdot 0{,}365 - 0{,}08\ (-0{,}003) = 0{,}15$$

Таким образом, уровень в скважине определяется величиной :

$$h_c = \sqrt{30^2 - \frac{2 \cdot 12000}{10}\left(0{,}15 + \frac{1}{10} \cdot 0{,}542\right)} = 20{,}2 \text{ м}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

(пример расчета)

Вывести формулу для определения притока к несовершенной траншее, расположенной вблизи карьера (рис.67);

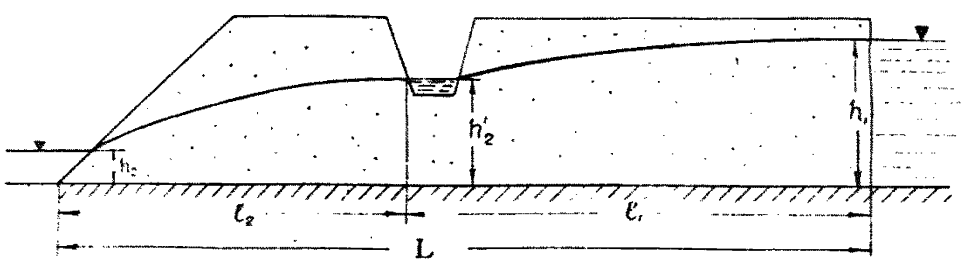


Рис.67. Схема к расчету несовершенной траншеи вблизи карьера.

в траншее поддерживается постоянный уровень h'_2 .

Вывод проводится в соответствии с гл.Ш,§ 2, п.Б2, раздел Ш.

1. Несовершенная траншея заменяется совершенной с фиктивным уровнем воды в ней $h'_{2ф}$, определяемым по формуле (Ш.11), и с погонным притоком q .

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

$$q_1 = \frac{k\left(h_1^2 - h_{2ф}'^2\right)}{2\ell_1} .$$

Расход потока, выходящего в котлован с уровнем воды в нем h_2, выражается как

$$q_{пр} = \frac{k(h'^2_{2ф} - h^2_2)}{2l_2}$$

3. Составляется балансовое уравнение потока на линии траншеи: $q_1 = q + q_{пр}$,

$$\frac{k(h^2_1 - h'^2_{2ф})}{2l_1} = \frac{k(h'^2_{2ф} - h^2_2)}{2l_2} + q.$$

Подставляя в это уравнение выражение для $h_{2ф}$, получаем уравнение относительно q; решая его, находим выражение для расхода q:

$$q = \frac{k}{2} \frac{(h^2_1 - h^2_2)\frac{l_2}{L} + h^2_2 - h'^2_2}{\frac{l_1 \cdot l_2}{L} + 0{,}73\, h'_2 \lg \frac{h'_2}{\pi r_{0ф}}}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

(пример моделирования на гидроинтеграторе)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСУШЕНИЯ ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ РАБОЧЕГО БОРТА КАРЬЕРА

Область фильтрации разбивается равномерно на элементарные блоки длиной Δx (рис.68). При необходимости исследования режима подземных вод на участке вблизи контура дренажа, здесь производят более детальную разбивку на блоки.

Водоемкости блоков определяют по формуле (1.37), а фильтрационные сопротивления – по формуле (1.7а)(разд.1У).

Воспроизведение потока подземных вод на гидромоде-

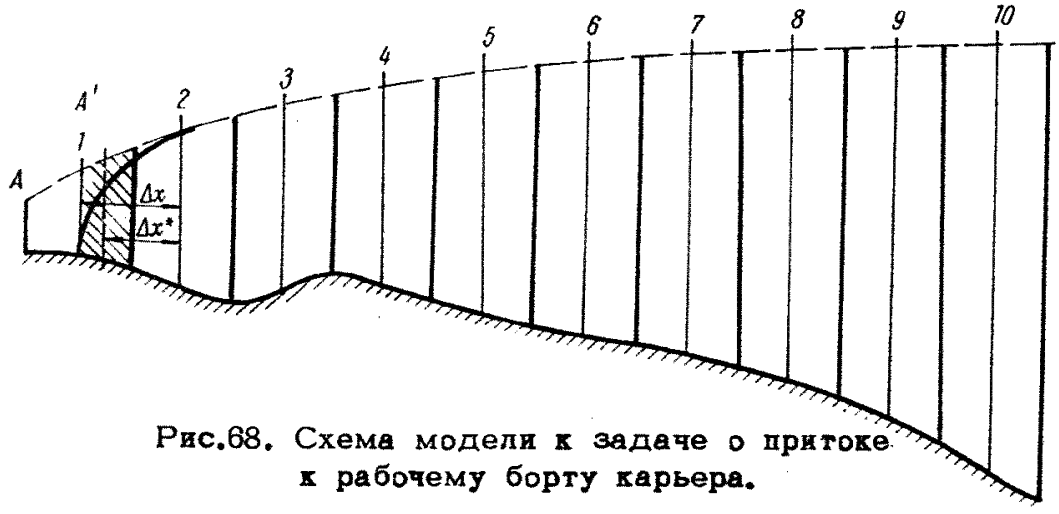


Рис.68. Схема модели к задаче о притоке к рабочему борту карьера.

ли осуществляется при помощи системы приливания; при этом величина расхода с учетом масштабных коэффициентов определяется по таблице 14. Гидравлические сопротивления на пути движения воды к водосливам системы приливания определяются по формуле (1У.7)(разд.1У).

Проведение задачи практически начинается с момента, соответствующего началу отработки очередной заходки, то есть при новом положении рабочего борта карьера. При перемещении контура дренажа подвижной сосуд, моделирующий граничное условие на нем, устанавливается на отметке водоупорного ложа, отвечающей новому положению борта карьера.

Моделирование осуществляется следующим образом. Гидроинтегратор включают при значениях гидравлических сопротивлений, соответствующих начальной депрессионной кривой. По прошествии заданного интервала времени гидроинтегратор выключают, фиксируют положение депрессионной поверхности и производят пересчет гидравлических сопротивлений по выражению

$$\rho = \frac{\rho_0 \, h'_{0\,ср}}{h'_{t\,ср}}, \qquad (А)$$

где ρ_0 – начальное гидравлическое сопротивление между смежными расчетными сечениями;

ρ_1 – новое значение гидравлического сопротивления;

$h_{0ср}$ – среднеарифметическое значение глубины потока подземных вод между смежными расчетными

сечениями в начальный момент времени;

$h'_{t_{ср}}$ – то же на конец расчетного интервала времени.

В соответствии с вычислениями изменяют гидравлические сопротивления на приборе, вновь выставляют исходную депрессионную кривую и производят повторный пуск гидроинтегратора. Так поступают до тех пор, пока по истечении расчетного интервала времени конечные кривые депрессии при двух последовательных пусках совпадут или будут незначительно отличаться друг от друга. Практически необходимо делать 3–5 приближений.

Приток воды к карьеру определяют объемным способом.

Изменение длины области фильтрации на величину, равную ширине заходки, учитывается уменьшением длины первого блока (на рис.68 измененный блок заштрихован), что влечет за собой изменение величины водоемкости и, соответственно, площади поперечного сечения первого сосуда. Пересчет гидравлического сопротивления между расчетными сечениями в измененном и смежном с ним блоках производится по формуле:

$$\rho = \frac{\rho_0 \cdot h'_{0ср} \cdot \Delta x^*}{h'_{t_{ср}} \cdot \Delta x}, \qquad (В)$$

где Δx^* – расстояние между расчетными сечениями в измененном и смежном с ним блоках (рис.68)

Полученная кривая депрессии, соответствующая времени отработки первой заходки, является исходной кривой для моделирования следующего интервала процесса осушения водоносного горизонта бортом карьера.

Моделирование значительной по длине области фильтрации приводит обычно к уменьшению точности моделирования в начальной стадии процесса распространения депрессионной поверхности. Поэтому моделирование сначала производится на ограниченной области фильтрации, длина которой последовательно наращивается по мере возрастания предела распространения депрессии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

(пример моделирования на сеточном электроинтеграторе)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ К ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ СКВАЖИНАМ, ПРОХОДИМЫМ ИЗ КАРЬЕРА

Для моделирования выделяется фрагмент, ограниченный параллельными линиями, нормальными контурам питания и стока, которые отвечают продольной оси скважины и среднему сечению между скважинами. Ввиду того, что поток подземных вод имеет пространственный характер только в зоне непосредственного расположения горизонтальных скважин, при решении задачи рекомендуется переходить постепенно на двухмерную, а затем и на одномерную разбивку исследуемой области. Длина зоны с трехмерной разбивкой принимается с некоторым запасом, чтобы учесть возмущение потока подземных вод у забоя горизонтальных скважин. В качестве потенциальной функции принимается $\varphi = h$.

Решим задачу при условии, что на контуре карьера и скважины $h = 0$.

Принятое граничное условие на контуре горизонтальной скважины правомочно в том случае, когда ее диаметр обеспечивает полный пропуск поступающего в нее притока подземных вод: в противном случае по длине скважины вводится дополнительное сопротивление для учета ее пропускной способности.

Моделирование процесса осушения однородной водоносной толщи на участке заложения горизонтальных скважин может быть осуществлено при разбивке области фильтрации, минимум, на три ряда блоков по вертикали. На участке трехмерной разбивки модель представляет собой пространственную решетку электрических сопротивлений, состоящую из трех параллельных плоских сеток, соединенных друг с другом посредством вертикальных сопротивлений.

За пределами участка расположения горизонтальной скважины пространственная решетка переходит в плановую сетку, а затем в одномерную цепочку.

Фильтрационные сопротивления по координате X рассчитываются по формуле (1.7), (разд.1У), где $m = \Delta Z$ при подсчете сопротивлений по координате У следует в этой формуле величины Δx и Δy поменять местами. Вертикальные фильтрационные сопротивления определяются по зависимости (1.8а) где вместо Δx подставляется величина $\Delta x \cdot \Delta y$. Подсчет временных сопротивлений осуществляется по выражению (1.31

Решение задачи подобного вида обязательно сопровождается проверкой представительности электромодели, которая заключается в установке соответствия глубин потока и расхода в натуре и на модели на начальный момент времени.

Положение депрессионной поверхности на сеточном электроинтеграторе следует фиксировать при помощи специальных узловых точек, которые соединяются с узлами электромодели посредством "висячих" вертикальных сопротивлений. Для этого потенциалы на известный момент времени подаются на временные сопротивления, которые соеденены также со специальными узловыми точками. В них и проводится снятие значений потенциалов через интервал времени Δt .

Чтобы избежать деформаций депрессионной поверхности при переходе ее с верхнего ряда блоков в нижележащий, необходимо выдержать точное соответствие между начальной схемой электромодели и схемой на момент времени t . Оно может быть достигнуто (при постоянной разбивке на блоки по вертикали и фиксированном высотном положении центров блоков первоначальной разбивки) соответствующим исключением из схемы электромодели электрических сопротивлений.

Когда значение потенциала в сечении 1 (рис.69) будет соответствовать высотному положению узловой точки 1, вертикальное сопротивление $1\text{-}1'$ отключается и временное сопротивление из узла 1 переносится в узел $1'$.

Электрическое сопротивление по координате X между сечением 1 и узловой точкой $2'$ будет функционировать до

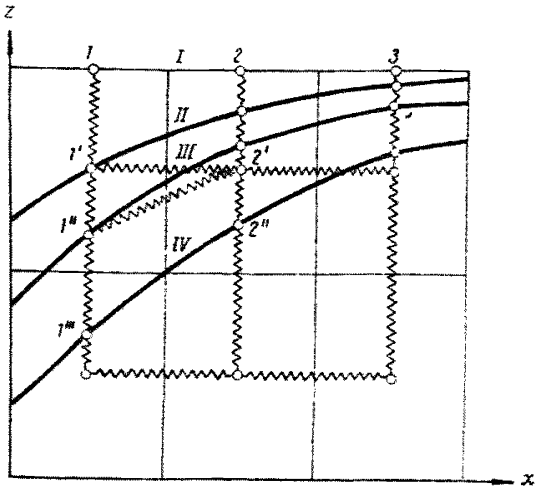


Рис.69. Схема к моделированию горизонтальных скважин.

тех пор, пока депрессионная поверхность не займет положение 1У, при котором мощность потока в пределах верхнего ряда блоков (посредине между сечениями 1-2) равна нулю.

Решение задачи проводится по методике, изложеной в главе П, § 2, п.3 (разд.1У).

При этом пересчет вертикальных электрических сопротивлений осуществляется по зависимости

$$R = \frac{R_0 \cdot \Delta Z_t}{\Delta Z_0}, \qquad (C)$$

где R_0 - электрическое сопротивление на начальный момент времени;

ΔZ_0 - расстояние между узловыми точками по вертикали в начальный момент времени;

ΔZ_t - то же на конец расчетного интервала времени.

Приток к борту карьера и к горизонтальной скважине определяется по замерам силы тока, протекающего через соответствующие электрические сопротивления. Для построения гидродинамической сетки на какой-либо момент времени значения потенциалов снимаются во всех узлах электромодели.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

РАЗДЕЛ Ш. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ.

Введение 4

Г л а в а 1. Общие вопросы фильтрационных расчетов.

§ 1. Гидродинамическая характеристика процесса осушения 12

§ 2. Задачи фильтрационных расчетов процесса осушения 13

§ 3. Основные исходные данные для фильтрационного расчета и составление природной гидрогеологической схемы 14

§ 4. Типизация условий фильтрации и определение общей расчетной схемы 18

§ 5. Рекомендуемый порядок фильтрационных расчетов процесса осушения карьерного поля. 23

Г л а в а П. Методы схематизации условий фильтрации.

§ 1. Выделение расчетных лент тока 28

§ 2. Приведение планового потока к плоскому одномерному 29

§ 3. Принцип "большого колодца" и величина условного радиуса влияния 31

§ 4. Определение приведенного радиуса карьера и дренажной системы 37

§ 5. Приведение неоднородных в фильтрационном отношении толщ к однородным. 39

§ 6. Приведение напорно-безнапорной фильтрации к напорному или безнапорному движению. . . . 44

§ 7. Учет уклона и волнистости водоупора в условиях безнапорной фильтрации 45

Г л а в а Ш. Способы учета и схематизации на внутренних границах области фильтрации (на контурах карьеров и дренажных устройств).

§ 1. Замена рядов скважин фиктивными траншеями (метод фильтрационных сопротивлений) 48

§ 2. Приведение несовершенных выработок к совершенным. Учет несовершенства дренажного контура. 50

§ 3. Учет величины участка высачивания 54

§ 4. Учет сопротивления фильтров и песчано-гравийного заполнителя скважины 56

§ 5. О водозахватной способности скважины 58

Г л а в а 1У. Расчеты фильтрации к открытым горным выработкам .

§ 1. Расчеты установившейся фильтрации в типовых условиях 59

§ 2. Расчеты установившейся фильтрации в сложных условиях 65

§ 3. Расчет неустановившейся фильтрации в простейших частных случаях 65

§ 4. Расчет неустановившейся фильтрации в сложных условиях 70

§ 5. Учет некоторых дополнительных факторов 74

Г л а в а У. Фильтрационный расчет дренажных скважин

§ 1. Расчеты установившейся фильтрации в типовых условиях 81

§ 2. Расчеты установившейся фильтрации в сложных условиях 86

§ 3. Расчет неустановившейся фильтрации в типовых условиях 91

§ 4. Расчет неустановившейся фильтрации в сложных условиях 103

Г л а в а У1. Расчеты других видов дренажных устройств.

§ 1. Расчет горизонтальных открытых и закрытых дрен (канав, траншей и т.п.) 106

§ 2. Расчет дренажных штреков 111

§ 3. Расчет горизонтальных скважин 113

§ 4. Расчет вакуумных скважин и иглофильтров . . . 117

ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ Ш 118

РАЗДЕЛ 1У. ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

Г л а в а 1. Методические основы моделирования

§ 1. Общие вопросы моделирования 123

§ 2. Обоснование расчетной модели и основные принципы электрогидродинамической аналогии. . . 126

§ 3. Принципы составления моделей 131

§ 4. Общий порядок моделирования и задание граничных условий 135

§ 5. Особенности методики моделирования неустановившейся фильтрации. 140

Г л а в а П. Моделирование фильтрации к открытым горным выработкам.

§ 1. Моделирование установившейся фильтрации . . . 152

§ 2. Моделирование неустановившейся фильтрации . . 160

Г л а в а Ш. Моделирование фильтрации к дренажным устройствам .

§ 1. Моделирование установившейся фильтрации к вертикальным дренажным скважинам . . . 165

§ 2. Моделирование неустановившейся фильтрации к вертикальным дренажным скважинам 171

§ 3. Моделирование горизонтальных дрен. 173

Глава 1У. Особенности моделирования, связанные с учетом различных дополнительных факторов.

§ 1. Учет инфильтрационного питания 177

§ 2. Учет перетекания 183

§ 3. Учет уклона водоупора при безнапорной фильтрации 185

§ 4. Учет напорно-безнапорного режима фильтрации. 187

ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ 1У 188

ПРИЛОЖЕНИЯ К РАЗДЕЛАМ Ш И 1У 190

РУКОВОДСТВО
ПО ДРЕНИРОВАНИЮ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ
Разделы III и 1У

Отв.ред. В.А.Мироненко
Лит. ред. К.К. Глазенап Техн. ред. В.С.Сапожников

Печатный цех ВНИМИ Заказ № 54 Тираж 1000 25/X1-68 г.
М-43097 Объем 13 п.л. Цена 91 коп.

gost.e-ecolog.ru