МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР

ГЛАВЭНЕРГОПРОЕКТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ФИЛЬТРАЦИОННЫМ РАСЧЕТАМ ВОДОПОНИЗИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР

ГЛАВЭНЕРГОПРОЕКТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ФИЛЬТРАЦИОННЫМ РАСЧЕТАМ ВОДОПОНИЗИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

Методические указания по фильтрационным расчетам водопонизительных установок

Ответственный редактор *Б. Н. Ржонсницкий*
Технический редактор *Л. С. Абрамсон*

М-37818. 5-VIII 1961 г. Печ. л. 7,75 + 3 вкл. Зак. 94. Цена 30 коп. Тир. 1500.

Типография Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева. Ленинград, К-64, Гжатская ул., 21.

Настоящие «Методические указания по фильтрационным расчетам водопонизительных установок» составлены в Фильтрационной лаборатории имени акад. Н. Н. Павловского Всесоюзного научно-исследовательского института имени Б. Е. Веденеева мл. научн. сотр., канд. техн. наук Л. Н. Павловской и во Всесоюзном научно-исследовательском институте ВОДГЕО ст. научн. сотр., канд. техн. наук В. М. Шестаковым.

Утверждены 8 июня 1960 г. заместителем начальника Главэнергопроекта МСЭС для использования в проектных организациях и на строительствах Министерства.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Строительство гидротехнических сооружений (бетонных плотин, зданий ГЭС, судоходных шлюзов и др.) в руслах и поймах рек, как правило, связано с необходимостью понижения уровня грунтовых вод в пределах строительной площадки. Водопонижение в котлованах гидротехнических сооружений является важным элементом строительства, от рациональной организации которого во многом зависит успешное выполнение плана. Практика последних лет показывает, что затраты на водопонижение в строительных котлованах гидроузлов составляют значительную долю от общей суммы затрат на весь гидроузел и снижение стоимости работ по водопонижению является важной задачей. Опыт проведения водопонижений в строительных котлованах гидроузлов показывает, что уменьшение стоимости этих работ может быть частично достигнуто усовершенствованием методов проектирования водопонижения и исключением не всегда оправданных запасов, принимаемых в проектах. Следует отметить, что до настоящего времени отсутствуют обобщающие руководства по проектированию водопонижения в строительных котлованах и фильтрационным расчетам водопонизительных установок. Поэтому составление методических указаний по фильтрационным расчетам водопонизительных установок является весьма важной научно-технической задачей.

В настоящих „Методических указаниях" приводится методика фильтрационных расчетов во все периоды водопонижения в строительных котлованах гидротехнических сооружений (период первоначальной откачки, поддержания проектных уровней грунтовых вод в межень и в паводок). При их составлении были максимально использованы результаты специальных научно-исследовательских работ, выполненных во ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева и ВНИИ ВОДГЕО, а также в других научно-исследовательских и проектных организациях СССР. В „Методических указаниях" был учтен опыт водопонижения при строительстве крупнейших гидроузлов СССР (Куйбышевского, Сталинградского, Каховского, Цимлянского и др.). И хотя в них имелось в виду водопонижение с помощью глубинных скважин-колодцев, оборудованных глубинными насосами и эжекторными иглофильтрами,

многие положения настоящей работы применимы и в случае водопонижения с помощью легких иглофильтровых установок.

Предлагаемые „Методические указания" составлены применительно к водопонижению при строительстве гидротехнических сооружений. Вместе с тем следует подчеркнуть, что изложенная ниже методика может быть также использована для фильтрационного расчета водопонижения при разработке месторождений полезных ископаемых. Особенно близки к рассматриваемым задачам условия открытой разработки месторождений полезных ископаемых, получающие все более широкое распространение и требующие значительных понижений уровня грунтовых вод.

Методические указания могут быть использованы также при фильтрационном расчете водопонижения и дренажа в промышленном строительстве.

Отдельные параграфы работы написаны различными авторами, а именно: § 2, 3, 6—11, 17, 20 (*б*) и приложения 2, 3 написаны ст. научн. сотр. ВНИИ ВОДГЕО, канд. техн. наук В. М. Шестаковым; § 1, 4, 12, 16, 18, 19, 20 (*а*) и приложение 1 — мл. научн. сотр., канд. техн. наук ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева Л. Н. Павловской, § 5 обоими авторами совместно. В целом же работа по составлению „Методических указаний" проходила в тесном контакте между авторами.

Принятые основные условные обозначения

h_0 — начальная глубина потока;
h — пониженная глубина потока;
$h_к$ — глубина потока на контуре питания;
$h_с$ — глубина потока в скважине;
S — понижение уровня;
$S_с$ — понижение уровня в скважине;
$S_к$ — понижение уровня под дном котлована или на границе пласта;
$S_{д.м}$ — допустимое понижение в межень;
$S_{д.п}$ — допустимое понижение в паводок;
T — мощность пласта;
v_0 — скорость повышения (понижения) уровня на границе;
q — удельный дебит линии скважин;
$Q_с$ — дебит скважины;
$Q_л$ — дебит линии равного притока или ленты тока;
$Q_м$ — общий дебит установки в межень;
$Q_п$ — общий дебит установки в паводок;
Q_0 — общий дебит установки в первоначальную откачку;
$Q_{с.опт}$ — дебит скважины, соответствующий оптимальной производительности насоса;
$Q_{с.пр}$ — дебит скважины, соответствующий предельной производительности насоса;
$f_с$, $f_{с.t}$ — функция понижения от действия одной скважины при установившемся и неустановившемся режимах;
f, f_t — функция понижения от действия одной линии равного притока при установившемся и неустановившемся режимах;
t — время;
$t_к$ — общее время проведения первоначальной откачки;
$Ф_к$ — внутреннее фильтрационное сопротивление контура системы скважин;
k — коэффициент фильтрации;
μ — коэффициент водоотдачи (насыщения);
β — параметр Буссинеска (коэффициент уровнепроводности);
a — коэффициент пьезопроводности;
a — шаг скважин;
$d_с$ — диаметр скважины;

$r_с$ — радиус скважины;
r — расстояние от скважины до точки;
$b_л$ — расчетная ширина ленты тока;
$L_л$ — расчетная длина ленты тока;
$n_с$ — количество скважин;
n — количество линий равного притока.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ ВОДОПОНИЖЕНИЯ

§ 1. Расчетные случаи водопонижения в строительных котлованах гидротехнических сооружений и задачи фильтрационных расчетов водопонижения

Для гидротехнических сооружений характерна близость водотока. Поэтому колебание уровней воды в реке оказывает существенное влияние на режим фильтрации грунтовых вод при водопонижении в строительных котлованах гидротехнических сооружений.

Различают:

меженный режим реки, при котором уровни воды в ней практически не изменяются во времени;

паводковый режим реки, при котором горизонты воды в ней изменяются во времени, сначала нарастая над меженным горизонтом, а затем падая до него.

В процессе водопонижения в строительных котлованах гидротехнических сооружений можно выделить следующие периоды:

период первоначальной откачки;

период поддержания проектных уровней грунтовых вод.

В период первоначальной откачки система глубинного водоотлива эксплуатируется с целью снижения первоначальных естественных уровней грунтовых вод до проектных отметок. Если котлован разрабатывается насухо, то для проведения первоначальной откачки, как правило, эксплуатируется только система глубинного водоотлива, под защитой которого и выполняется выемка грунта. Если же котлован разрабатывается способом гидромеханизации, то водопонижение начинается после разработки котлована и сочетается с открытым водоотливом из него.

В условиях безнапорной фильтрации в период первоначальной откачки происходит осушение грунта выше проектных уровней свободной поверхности. Поэтому период первоначальной откачки называется в этом случае также периодом осушения грунта.

В условиях напорной фильтрации в период первоначальной откачки происходит снижение первоначальных напоров до проектных отметок, но грунт при этом не осушается. В этом случае период первоначальной откачки называют также периодом разгрузки напорного горизонта.

Первоначальная откачка может осуществляться как при меженнем, так и при паводковом горизонтах воды в реке. Однако проведение первоначальной откачки в паводок неэкономично и поэтому календарный план производства работ целесообразно составлять таким образом, чтобы первоначальная откачка проводилась в межень.

Период поддержания проектных уровней грунтовых вод наступает после периода первоначальной откачки. При длительных сроках возведения сооружения поддержание проектных уровней грунтовых вод может приходиться и на межень, и на паводок.

Режим фильтрации может практически считаться установившимся только при поддержании проектных уровней грунтовых вод в межень. При поддержании проектных уровней грунтовых вод в паводок и при первоначальной откачке имеет место неустановившийся режим фильтрации.

Таким образом, целесообразно выделить следующие расчетные случаи водопонижения:

1) случай поддержания проектных уровней грунтовых вод в межень;

2) случай поддержания проектных уровней грунтовых вод в паводок;

3) случай первоначальной откачки в межень.

В качестве основного расчетного случая рационально принимать первый случай, соответствующий наиболее длительному периоду водопонижения. Остальные расчетные случаи являются поверочными.

Задачами фильтрационных расчетов водопонижения являются:

а) определение общего дебита водопонизительной установки, а для контурных систем скважин и среднего удельного дебита по контуру водопонизительной установки при заданных сниженных уровнях грунтовых вод на дренируемой территории;

б) определение общего количества скважин водопонизительной установки при заданном дебите одной скважины, соответствующем производительности выбранного насосного оборудования;

в) рациональное размещение скважин по контуру водопонизительной установки в плане;

г) определение общей глубины скважины;

д) проверка понижения уровня грунтовых вод в самих скважинах, находящихся в наиболее неблагоприятных условиях.

Указанные задачи рекомендуется решать в два приема, используя сначала упрощенные, а затем более точные методы фильтрационных расчетов водопонижения (см. § 5).

Расчет для случая поддержания проектных уровней грунтовых вод в межень выполняется для условий установившегося режима фильтрации. Дебит каждой скважины принимается соответствующим оптимальной производительности насоса выбранной марки. При этом условии в указанный период, который является наиболее длительным периодом водопонижения, к. п. д. водопонизительной установки проектируется близким к оптимальному настолько, насколько это позволяют характеристики используемого насосного оборудования.

Отметим, что часто не представляется возможным подобрать такой насос, оптимальный напор которого соответствует напору, требуемому в процессе водопонижения. Обычно этот напор менее оптимального. Поэтому, принимая дебит скважины соответствующим оптимальной производительности насоса, не всегда можно обеспечить оптимальные условия эксплуатации водопонизительной установки. Вместе с тем в ходе дальнейших расчетов в таких случаях необходимо учитывать, что имеется возможность увеличить дебит скважины, так как производительность насоса может быть увеличена до предельной. Скважины, необходимые для водопонижения в период поддержания проектных уровней грунтовых вод в межень, являются основными скважинами установки, и для них в первую очередь должен быть решен вопрос рациональной расстановки.

Расчет для случая поддержания проектных уровней грунтовых вод в паводок следует выполнять для условий неустановившегося режима фильтрации, так как горизонты воды в реке в этот период изменяются во времени. Кроме того, для несовершенных котлованов (§ 2) следует иметь в виду, что в паводок норма осушения может быть принята несколько меньшей, чем в межень. В межень проектные уровни грунтовых вод обычно принимаются на 2—3 *м* ниже отметки дна котлована, в паводок норму осушения можно снизить до 0,5—1 *м*.

С учетом этих обстоятельств и определяется общий дебит водопонизительной установки ($Q_п$) в рассматриваемый период и превышение его над общим дебитом установки ($Q_м$) для основного расчетного случая. Разность общих дебитов $\Delta Q_п = Q_п - Q_м$ определяет дополнительную мощность водопонизительной установки для случая поддержания проектных уровней в паводок. Дополнительная мощность может быть реализована двумя путями: за счет имеющейся возможности увеличения расходов насосов основных скважин до предельной производительности, а если этого недостаточно, то и за счет ввода дополнительных скважин.

Местоположение дополнительных скважин определяется уже в системе основных скважин водопонизительной установки, расставленных наивыгоднейшим образом для периода поддержания проектных уровней в межень. Дебит основных и дополнитель-

ных скважин в паводок принимается соответствующим предельной производительности насоса.

Расчет для случая первоначальной откачки выполняется для условий неустановившегося режима фильтрации. В конце этого периода понижение уровней в определенных точках на территории котлована должно быть равно понижению при установившемся режиме фильтрации для случая поддержания проектных уровней в межень.

Время, в течение которого должна быть осуществлена первоначальная откачка, задается из условий производства работ на основании общего календарного плана строительства. Если котлован разрабатывается насухо, то осушение грунта опережает его разработку. В этом случае, а также при разгрузке напорного горизонта дебит водопонизительной установки в период первоначальной откачки определяется только исходя из условия завершения первоначальной откачки в заданный срок. Если же котлован разрабатывается способом гидромеханизации, то водопонижение сочетается с открытым водоотливом из котлована. В этом случае дебит водопонизительной установки в период первоначальной откачки определяется исходя из условия завершения осушения грунта в заданный срок и обеспечения устойчивости откосов котлована при заданной скорости понижения в нем поверхностных вод.

Дополнительная мощность водопонизительной установки, необходимая для проведения первоначальной откачки, определяется величиной превышения общего дебита водопонизительной установки в период первоначальной откачки (Q_0) над общим дебитом ее в период поддержания проектных уровней грунтовых вод при меженном горизонте ($Q_м$), т. е. определяется величиной $\Delta Q_0 = Q_0 - Q_м$. Эта дополнительная мощность реализуется так же, как и в паводок. Сравнивается дополнительное количество водопонизительных средств, необходимых в паводок и в период первоначальной откачки, и окончательно выбирается наибольшее из них.

§ 2. Типизация строительных котлованов гидротехнических сооружений в зависимости от гидрогеологических условий

Типизация котлованов в зависимости от гидрогеологических условий может быть проведена по двум основным направлениям: по гидрогеологическому строению разреза котлована и по гидрогеологическим условиям в плане.

а. Типизация по гидрогеологическому строению разреза котлована

Схема 1. Совершенные котлованы в однородных грунтах. Совершенными называют котлованы, дно которых представляет собой водоупор по отношению к грунтам, в

которых разрабатывается котлован, причем последние принимаются относительно однородными[1] (рис. 1).

Водопонизительная установка в данном случае обычно состоит из системы водопонизительных скважин, оконтуривающих котлован.

Характерно, что в совершенных котлованах система скважин не может перехватить весь фильтрационный поток, поступающий к котловану, и часть его неизбежно прорывается к откосам. Для дополнительного перехвата потока вблизи откосов иногда устанавливают еще и легкие иглофильтровые установки. Однако и

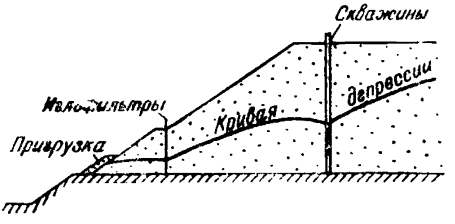


Рис 1.

эти установки могут не перехватить всего фильтрационного потока, и часть его выйдет на откосы котлована, вызывая оплывание в пределах участка высачивания. Для защиты от оплывания в пределах участка высачивания рекомендуется укладывать фильтрующую пригрузку. Грунтовая вода, высачивающаяся на откосы, должна быть откачана из котлована с помощью открытого водоотлива.

Таким образом, для совершенного котлована неизбежно сочетание открытого и глубинного водоотлива. Вопрос о том, каково должно быть соотношение открытого и глубинного водоотлива, должен решаться на основании технико-экономических расчетов.

Схема 2. Несовершенные котлованы в однородном грунте. Несовершенными называют котлованы, дно которых не доходит до водоупора (рис. 2).

Для этого типа котлованов водопонижение, как и в предыдущем случае, обычно осуществляется с помощью систем скважин, оконтуривающих котлован.

В больших котлованах, размеры которых определяются сотнями метров, в дополнение к контурной установке иногда устраиваются ряды скважин внутри котлована, целью которых является ускорение водопонижения в период первоначальной откачки.

[1] К этому же типу следует отнести котлованы в песчаных грунтах, когда верхняя часть откоса сложена покровными суглинками или супесями сравнительно небольшой мощности.

Однако наличие этих рядов сильно усложняет условия производства работ по выемке котлована и потому к их устройству следует прибегать только в исключительных случаях.

Схема 3. Котлованы, прорезаемые малопроницаемыми прослоями. Довольно часто встречаются условия, когда откосы котлована, располагаемого, в основном, в песчаных

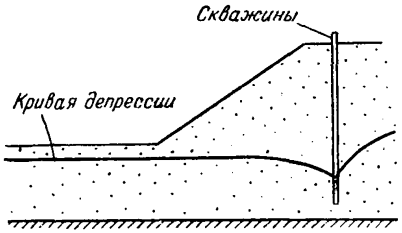


Рис. 2.

грунтах, прорезаются сравнительно малопроницаемым прослоем, представленным глинистыми или иловатыми грунтами (рис. 3).

В этом случае фильтрационный поток, поступающий к котловану, делится на два потока — верхнего и нижнего горизонтов, причем между обоими потоками, как правило, сохраняется гидравлическая связь через малопроницаемый прослой. Условия в верхнем горизонте оказываются близкими к условиям совершенного котлована (рис. 1), а условия в нижнем горизонте оказываются близкими к условиям несовершенного котлована (рис. 2). В соответствии с этим водопонижение в верхнем горизонте обычно осуществляется с помощью комбинации легких иглофильтровых установок с фильтрующей пригрузкой, уложенной в пределах высачивания на откосы котлована, а водопонижение в нижнем слое — с помощью системы водопонизительных скважин, располагаемых по контуру котлована.

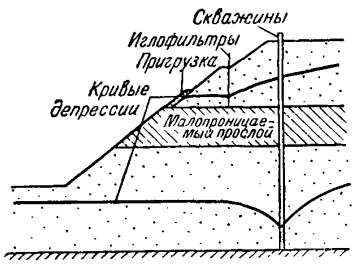


Рис. 3.

Некоторую специфику в водопонижение здесь вносит необходимость осушения малопроницаемого прослоя, грунты которого обычно в водонасыщенном состоянии обладают малой прочностью, а в воздушно-сухом состоянии держат достаточно крутые откосы.

В связи с этим следует считать целесообразным, чтобы до проходки малопроницаемого прослоя водопонижение в нижнем слое достигло снижения уровня фильтрационного потока вблизи откоса котлована за пределы малопроницаемого прослоя.

Схема 4. Водопонижение в двухслойной среде (рис. 4). В данном случае водопонижение должно быть осуществлено в верхнем слабопроницаемом слое небольшой мощности, подстилаемым значительно более водообильным напорным горизонтом. К такого рода схеме приводятся случаи, когда водопонижение должно осуществляться в суглинистом или супесчаном

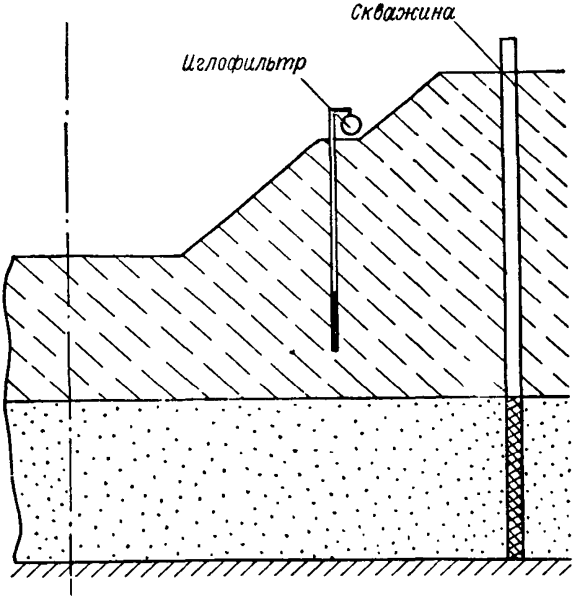


Рис. 4.

покровном слое, под которым располагается водоносный песчаный горизонт, а также когда песчаный слой, в котором происходит водопонижение, подстилается гравелистым горизонтом или водообильным слоем скальных грунтов.

В этих случаях водопонижение обычно устраивается как с помощью водопонизительных скважин, устанавливаемых в напорном горизонте, так и с помощью легких иглофильтровых установок, устанавливаемых в верхнем сравнительно слабопроницаемом слое.

Схема 5. Водопонижение в напорных горизонтах (рис. 5). При расположении напорных водоносных горизонтов вблизи дна котлована может возникнуть опасность взвешивания дна котлована за счет воздействия избыточного гидродинамического давления в напорном горизонте. В этом случае приходится идти на устройство водопонизительных скважин в напорном горизонте для разгрузки его от избыточного давления. В соответствии со своим назначением такие скважины обычно называются разгрузочными.

Схемы расположения разгрузочных скважин принимаются такими же, как и для водопонизительных скважин, т. е. как правило, по контуру котлованов. При малой водопроводимости напорных горизонтов в процессе проходки котлованов иногда приходится усиливать контурные схемы рядами скважин внутри котлована. Однако такое решение может применяться лишь как крайнее, так как оно значительно усложняет производство работ в котловане.

При проектировании системы разгрузочных скважин следует прежде всего обратить внимание на то, чтобы эта система обеспечивала разгрузку горизонта в течение приемлемого времени, которое определяется упругими свойствами грунтов (см. § 16 и приложение 3). Анализ работы крупных водопонизительных установок показывает, что даже для песчаных горизонтов время разгрузки может быть существенным.

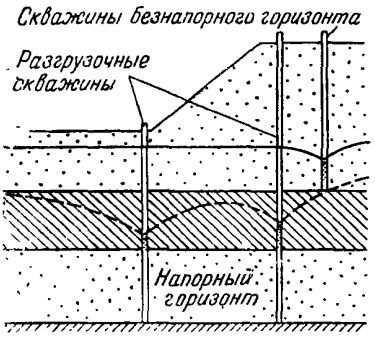


Рис. 5.

Большое значение в этих условиях может иметь перетекание из нижележащих и особенно из вышележащих горизонтов, которое может резко изменять характер питания напорного горизонта при работе водопонижения.

Откачка из разгрузочных скважин обычно ведется с помощью артезианских насосов. Однако при малой водообильности горизонта насосы используются нерационально, и здесь может быть целесообразным применение самоизливающихся скважин с изливом воды в котлован.

б. Типизация по гидрогеологическим условиям в плане[1]

В зависимости от условий на внешних боковых границах водоносного пласта, в котором размещается котлован, и геометрической формы этих границ можно выделить следующие расчетные схемы.

Схема 1. Котлован в неограниченном пласте. Пласт можно рассматривать, как неограниченный, если влияние водопонизительной установки практически не достигает каких-либо границ пласта. Такого рода условия встречаются сравнительно редко, например, при разработке небольших котлованов, располагаемых вдали от рек или каких-либо других водоемов.

---

[1] При составлении настоящего раздела использована типизация гидрогеологических условий для целей расчета эксплуатационных запасов подземных вод, составленная Ф. М. Бочевером [Л. 9].

В таких случаях питание водопонизительных установок может осуществляться за счет неустановившейся фильтрации, перетекания из соседних горизонтов и инфильтрации.

Схема 2. Котлован в полуограниченном пласте. Полуограниченным называется пласт, ограниченный с одной стороны некоторым контуром питания, который вблизи котлована может быть принят прямолинейным. Довольно часто к такой схеме

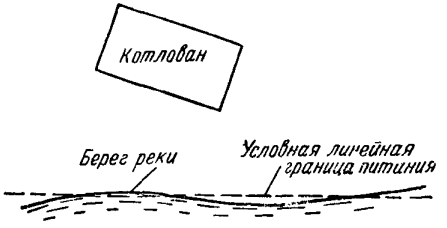


Рис. 6.

приводятся мелкие и средние котлованы (водопонизительные установки), располагаемые на берегу реки и получающие от реки основное питание (рис. 6). В связи с этим такие котлованы иногда называют береговыми.

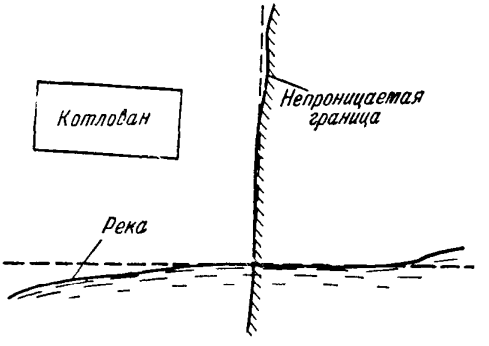


Рис. 7.

Усложненным вариантом полуограниченного пласта является схема пласта в углу между двумя контурами питания, которая возникает, когда котлован располагается в зоне слияния двух рек.

Близкой к ней является схема пласта в углу, ограниченного прямолинейным контуром питания (рекой) и непроницаемой границей (рис. 7). Такая схема может встретиться, например, в тех случаях, когда вблизи котлована река пересекает сброс, замыкающий водоносный горизонт.

Схема 3. Котлован в круговом пласте, ограниченном контуром питания. В тех случаях, когда контуры питания располагаются с разных сторон от котлована, а размеры пласта значительно больше размеров котлована, реальный контур питания, как правило, может быть заменен круговым.

Схема 4. Котлован в полосовом пласте. В тех случаях, когда водоносный пласт, в котором размещается котлован, ограничен в плане примерно параллельными границами, этот пласт можно рассматривать как полосовой.

Применительно к задачам водопонижения полосовой пласт встречается в двух основных вариантах, определяемых условиями на границах.

Первый вариант (рис. 8), когда обе границы пласта являются контурами питания (или стока), встречается, например, при рас-

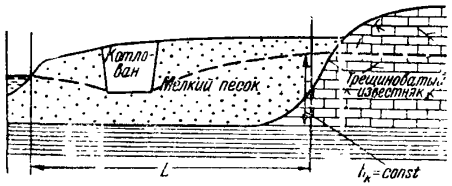


Рис. 8.

положении котлована в междуречьи или в пределах пойменной террасы, примыкающей к значительно более проницаемому коренному берегу (в последнем случае в качестве областей питания принимаются река и граница коренного берега).

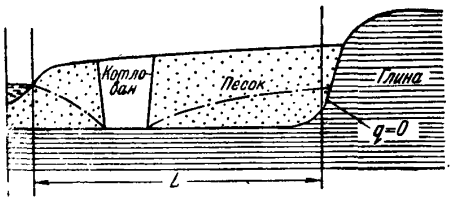


Рис. 9.

Второй вариант, когда одна из границ является непроницаемой, а вторая предсгавляет собой контур питания, характерен для котлована, располагаемого в пойме, примыкающей к слабопроницаемой надпойменной террасе (рис. 9).

Схема 5. Котлован в пласте сложной формы. Водопонизительные установки крупных котлованов, располагаемые вблизи контуров питания (особенно это характерно для крупных котлованов в гидроэнергетическом строительстве), находятся обычно в довольно сложных условиях питания, кото-

рые без большого ущерба для точности расчета не могут быть сведены к описанным выше сравнительно простым схемам.

В этих случаях приходится разделять всю область фильтрации на отдельные участки[1], в каждом из которых может быть принята простая схема питания.

§ 3. Учет фильтрационной неоднородности водоносного пласта и несовершенства его границ

Как правило, водопонижение приходится осуществлять в неоднородных, часто слоистого сложения водоносных пластах. Кроме того, боковые граничные поверхности водоносного пласта, образуемые ложем водотоков или водоемов, питающих пласт, обычно являются несовершенными, т. е. не доходят до водоупора.

В большинстве случаев можно применять приближенные приемы учета неоднородности водоносного пласта и несовершенства его границ, приводя пространственный поток к плоскому в плане, т. е. рассматривать так называемые плановые задачи [Л. 1, 2].

К однородной среде могут быть приведены грунты с близкими фильтрационными характеристиками, причем, как правило, такое приведение можно осуществлять для грунтов одинакового литологического состава.

Следует заметить, что возможность приведения грунтов к среде с одной проницаемостью определяется в зависимости от расположения и конструкции водопонизительной установки. В частности, вблизи водопонизительных скважин, особенно если они являются несовершенными, определение фильтрационных характеристик грунтов должно производиться гораздо тщательнее, чем в областях, удаленных от скважин.

При горизонтально-слоистом сложении фильтрующего слоя можно привести его к однородному, если соотношение коэффициента фильтрации отдельных слоев невелико. По Н. К. Гиринскому [Л. 13] отношение минимального коэффициента фильтрации к максимальному не должно быть в этом случае меньше $\frac{1}{20}$. Отметим, что в тех случаях, когда перетекание между слоями не имеет существенного значения, это отношение может быть принято гораздо меньшим.

Приведение к однородной среде потока, состоящего из n слоев с различными коэффициентами фильтрации (рис. 10), удобнее всего производить, вводя осредненный коэффициент фильтрации k, определяемый по формуле [Л. 16].

$$k = \frac{k_1 T_1 + k_2 T_2 + \ldots + k_n T_n}{T_1 + T_2 + \ldots + T_n}. \qquad (I,1)$$

[1] См. гл. II, § 19; гл. III, § 14.

Расчеты с приведением потока к плановому можно применять и не только в тех случаях, когда грунты приводятся к однородной по вертикали среде. Для неоднородного потока можно применять также приближенную методику расчета, согласно которой задача решается сначала как плановая, в предположении того, что поток по вертикали однороден. После получения решения для плановой задачи вырезаются ленты тока на ряде типовых участков и для них производится расчет с учетом неодно-

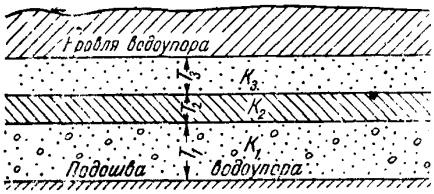


Рис. 10.

родности грунтов по вертикали, с приведением к плоскому в разрезе.

В условиях планово-плоской задачи расход фильтрационного потока $Q_л$ в пределах одной ленты тока выражается общей зависимостью

$$Q_л = k_{ср} T_{ср} \omega_{ср} I_{ср}, \qquad (I,2)$$

где $k_{ср}$, $T_{ср}$, $\omega_{ср}$ и $I_{ср}$ — средние величины коэффициента фильтрации, мощности, площади поперечного сечения и уклона потока.

Величина проводимости пласта $k_{ср}T_{ср}$ в безнапорном потоке зависит от глубины потока. Однако в связи с фильтрационной неоднородностью грунта эта зависимость чаще всего бывает выражена недостаточно определенно, причем колебания проводимости при изменении глубины потока в большинстве реальных условий вообще лежат в пределах практической точности ее определения. Поэтому целесообразно расчетные зависимости привести для случая постоянной проводимости. В такой предпосылке расчетные зависимости для безнапорного потока будут иметь идентичный вид с зависимостями для напорного потока, что позволяет значительно унифицировать эти зависимости, записав их относительно понижений уровня грунтовых вод S.

В тех случаях, когда безнапорный поток может быть принят однородным, изменение мощности потока в связи с изменением глубины можно учесть, вводя в расчет вместо действительного

понижения уровня грунтовых вод расчетное понижение S, определяемое как

$$S = \frac{h_0^2 - h^2}{2T} = \frac{2h_0 - S_0}{2T} S_0, \qquad (I,3)$$

где h_0 и h — начальная и пониженная глубина потока до водоупора в точке, для которой производится расчет;
$S_0 = h_0 - h$ — действительное понижение уровня грунтовых вод.

Выбор расчетной мощности T в данном случае не имеет значения, так как эта величина во всех зависимостях сокращается.

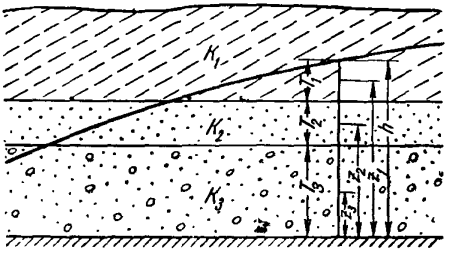


Рис. 11.

Таким образом, в однородном безнапорном потоке для определения расходов вместо действительного понижения S_0 следует вводить расчетное, вычисляемое по формуле (I,3).

При этом уровни потока определяются путем нахождения расчетной величины S, зная которую нетрудно найти действительное понижение S_0 по формуле

$$S_0 = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2ST}, \qquad (I,4)$$

которая прямо следует из уравнения (I,3).

Такого рода методика пересчета распространяется и на случай горизонтально-слоистого потока (рис. 11), который, пользуясь предложениями Н. К. Гиринского [Л. 13], можно привести к однородному, вводя расчетную глубину слоистого потока, определяемую по формуле

$$h_{сл}^2 = 2\left[\frac{k_1}{k} T_1 (h - z_1) + \right.$$

$$\left. + \frac{k_2}{k} T_2 (h - z_2) + \ldots + \frac{k_n}{k} T_n (h - z_n)\right], \qquad (I,5)$$

где k — выбранный расчетный коэффициент фильтрации;
$z_1, z_2, \ldots, z_n$ — расстояния от водоупора до центра тяжести соответствующего слоя (остальные обозначения видны из рис. 11).

Особо рассмотрим часто встречающийся случай напорно-безнапорного потока (рис. 12). В этом случае на контуре питания следует задать расчетную глубину потока $h_{н.б}$

$$h_{н.б} = \sqrt{2Th - T^2} \qquad (I,5а)$$

и дальнейший расчет производить, как для безнапорного потока в однородной среде.

Такой порядок расчета принимается в настоящих указаниях за основу. Исключением является схема совершенного котлована (рис. 1), так как для этого случая характерно обычно сравнительно однородное сложение фильтрационного потока при очень резком (практически до водоупора) снижении уровня грунтовых

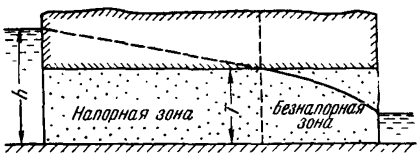


Рис. 12.

вод. Поэтому для схемы совершенного котлована (гл. II, § 10) все решения записаны, как для однородного безнапорного потока (с принятием в качестве потенциальной функции квадрата глубины потока h^2).

При расчетах вакуумного водопонижения, особенностью которого является наличие вакуума в прифильтровой зоне, определение дебита скважин можно производить, считая расчетное понижение S как сумму понижения уровня воды и дополнительного вакуума над уровнем. В условиях же однородного безнапорного потока следует считать

$$S = \frac{(2h_0 + S_ф)(S_ф + H_в)}{2T}, \qquad (I, 6)$$

где $S_ф$ — глубина заложения верхней части фильтра относительно статического уровня грунтовых вод;

$H_в$ — величина вакуума в этом же месте.

Ложе водотоков или водоемов, питающих водоносный пласт, обычно является несовершенным. В этом случае фильтрационный поток должен прежде всего преодолеть сопротивление грунтов под дном этого водоема. Удобно влияние этого сопротивления учитывать, увеличивая общую длину потока на величину ΔL, т. е. заменяя сопротивление грунтов под дном водоема эквивалентным сопротивлением линейного потока длиной ΔL. Этот прием широко применяется в практике разнообразных фильтрационных расчетов.

Приведем выражения величины ΔL для двух типовых случаев сложения дна водоема: однородного и двухслойного.

При однородном сложении (рис. 13-*а*)

$$\Delta L = 0{,}44T + 0{,}08\frac{T^2}{b} + \frac{h_p}{2+\frac{1}{m}}, \qquad (I, 7)$$

причем при $\frac{b}{T} > 1$ можно практически принимать

$$\Delta L = 0{,}5\,(h_p + T). \qquad (I,7а)$$

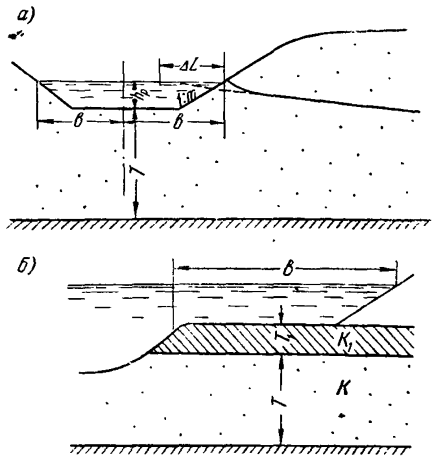


Рис. 13.

При двухслойном сложении, когда малопроницаемый слой прикрывает основной фильтрующий слой (рис. 13-*б*)

$$\Delta L = \sqrt{\frac{kTT_1}{k_1}}\, th\left(b\sqrt{\frac{k_1}{kT_1T}}\right), \qquad (I, 8)$$

а при питании из крупных рек, когда b велико, значение ΔL можно определять по формуле

$$\Delta L = \sqrt{\frac{kTT_1}{k_1}}. \qquad (I,8а)$$

§ 4. Учет несовершенства скважин водопонизительной установки

Различают два вида несовершенства скважин [Л. 29]: несовершенство по степени вскрытия пласта и несовершенство по ха-

рактеру вскрытия пласта. В первом случае скважины с абсолютно проницаемыми стенками прорезают пласт не на всю мощность, а частично. Во втором случае скважина вскрывает пласт на всю мощность, но стенки ее не являются абсолютно проницаемыми (стенки скважины могут состоять из проницаемого и непроницаемого участков или быть перфорированными). Скважина может быть несовершенной как по степени, так и по характеру вскрытия пласта одновременно.

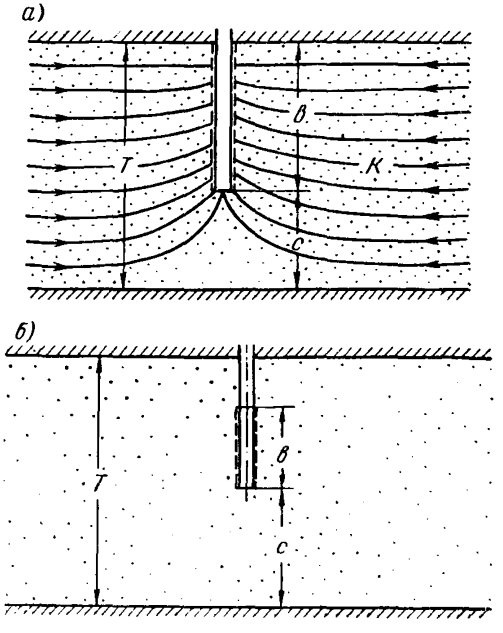


Рис. 14.

Если обсыпка скважины и конструкция ее фильтра запроектированы и осуществлены правильно[1], то при фильтрационных расчетах водопонижения потери напора при входе в скважину можно не учитывать, считая проницаемый участок стенок скважины абсолютно проницаемым, что и имеется в виду ниже.

Для напорных скважин различают скважины с фильтром, примыкающим к кровле пласта (рис. 14-*а*) и с фильтром, не примыкающим к кровле пласта (рис. 14-*б*). Для безнапорных скважин различают скважины с незатопленным фильтром (рис. 15-*а*), когда проницаемый участок стенки скважины поднимается выше уровня воды за скважиной, и с затопленным фильтром (рис. 15-*б*),

[1] Вопросы подбора состава обсыпки скважин и конструкции фильтра здесь не рассматриваются. Указанные вопросы излагаются в ряде трудов, например, в [Л. 12].

когда проницаемый участок стенки скважины расположен ниже уровня воды за скважиной.

Сначала фильтрационные расчеты водопонижения выполняются в предположении, что в случае напорных скважин фильтр примыкает к кровле пласта, а в случае безнапорных скважин фильтр не затоплен. После определения уровня воды в скважинах, длины фильтровой части скважин и выбора водопонизительного оборудования расчет можно уточнить, учтя местоположения фильтра.

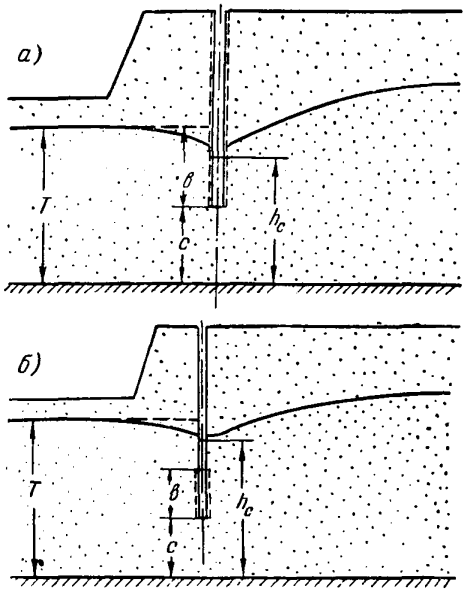


Рис. 15.

Согласно методу эквивалентных фильтрационных сопротивлений (см. приложение 1) несовершенство скважин учитывается следующим образом.

Расчет системы отдельно стоящих несовершенных скважин следует выполнять по тем же формулам, что и для совершенных скважин, но вместо действительного радиуса каждой несовершенной скважины (r_c) необходимо иметь в виду расчетный радиус ($r_{c.p}$), который определяется по формуле

$$r_{c.p} = \alpha r_c, \qquad (I, 9)$$

где $\alpha = 2{,}718^{-2\pi\Phi_н}$.

Величина $\Phi_н$ называется дополнительным фильтрационным сопротивлением, обусловленным несовершенством одиночной скважины, и определяется по формуле [Л. 11]

$$\Phi_н = \frac{1}{2\pi}\,\frac{1-\bar{b}}{\bar{b}}\left(\ln\frac{b}{r_c} - \varepsilon\right). \qquad (I, 10)$$

Здесь

b — расчетная длина проницаемого участка стенки скважины, определяемая так, как это указано на рис. 14-*а,б*; 15-*а,б*;

$\bar{b} = \frac{b}{T}$;

ε — величина, которая определяется по графику на рис. 16.

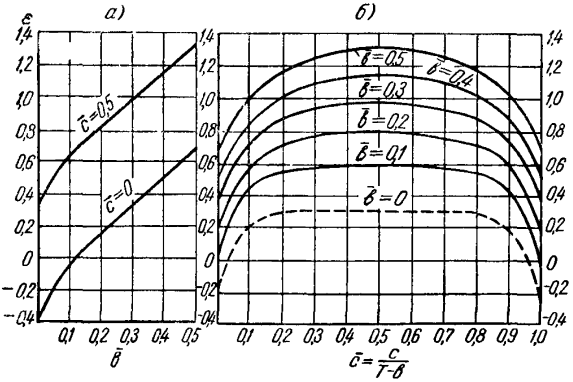


Рис. 16.

При использовании этого графика следует иметь в виду, что $\varepsilon(\bar{b}) = \varepsilon(1 - \bar{b})$ (например, ε при $\bar{b}=0{,}7$ определяется, как ε при $\bar{b} = 1 - 0{,}7 = 0{,}3$) и что $\bar{c} = \frac{c}{T-b}$, причем для скважин с фильтром, примыкающим к кровле пласта, или с незатопленным фильтром $\bar{c} = 1$.

Под величиной T здесь в случае напорных скважин имеется в виду мощность пласта (рис. 14-*а,б*), а в случае безнапорных скважин — расчетная мощность пласта (рис. 15-*а,б*), которую для практических расчетов водопонижения целесообразно принимать равной заданной глубине грунтовых вод под дном котлована.

При большом количестве скважин, расположенных по определенному геометрическому контуру (контурная система скважин, см. § 5), расчет выполняется по тем же формулам, что и для совершенных скважин, но со следующей поправкой. Вместо внутреннего фильтрационного сопротивления контура совершен-

ных скважин $\Phi_к$ (см. приложение 1), которое определяется по формуле [Л. 6]

$$\Phi_к = 0{,}367 \lg \frac{\sigma}{2\pi r_с}, \qquad (I, 11)$$

где σ — шаг скважин;

$r_с$ — радиус скважины,

следует иметь в виду внутреннее фильтрационное сопротивление контура несовершенных скважин, которое определяется по формуле

$$\Phi_к = \Phi_к' + \Phi_н + \Delta\Phi_н. \qquad (I, 12)$$

Здесь $\Phi_к'$ вычисляется по формуле (I, 11), $\Phi_н$ — по формуле (I, 10).

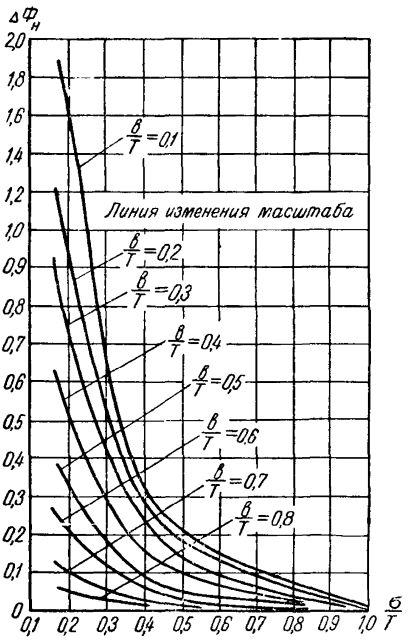


Рис. 17.

Величина $\Delta\Phi_н$ называется дополнительным фильтрационным сопротивлением, обусловленным несовершенством скважины и ее взаимодействием с другими скважинами, и определяется по графику на рис. 17 [Л. 23]. $\Delta\Phi_н$ следует учитывать только в том случае, когда $\frac{\sigma}{T} < 1$. При $\frac{\sigma}{T} \geqslant 1$ $\Delta\Phi_н = 0$.

Заметим, что для контурной системы безнапорных скважин расчетную мощность пласта T можно принимать равной глубине потока ($h_л$) в точке расположения скважины на контуре эквивалентной траншеи, заменяющей участок скважины (см. приложение 1).

§ 5. Порядок фильтрационных расчетов водопонизительных установок

1. Прежде всего необходимо установить расчетную схему котлована и водоносного пласта, в котором он расположен, в зависимости от гидрогеологических условий в разрезе и в плане (см. § 2).

Методика фильтрационных расчетов водопонижения существенно различается для типовых и сложных гидрогеологических условий.

Под типовыми гидрогеологическими условиями понимаются однородное в фильтрационном отношении строение водоносного пласта или такое строение, которое может быть приведено к однородному (см. § 3), и несложные условия питания, причем под последними разумеются условия питания, которые могут быть приведены к таковым для схем 1—4 (§ 2, п. *б*).

Под сложными гидрогеологическими условиями понимаются неоднородное строение водоносного пласта в плане и сложные условия питания, т. е. условия питания, которые не могут быть приведены к таковым для схем 1—4 (§ 2, п. *б*) и характерны для схемы 5 (§ 2, п. *б*).

Необходимо иметь в виду, что независимо от гидрогеологических условий самого водоносного пласта водопонижение для совершенных котлованов следует рассчитывать по той же методике, что и для котлованов, расположенных в пластах со сложными условиями, так как совершенный котлован играет роль области стока водоносного пласта во все периоды водопонижения.

Аналогичное замечание необходимо сделать и относительно котлованов, разрабатываемых способом гидромеханизации. В период первоначальной откачки котлован такого рода играет роль области питания или стока водоносного пласта.

В комплексе фильтрационных расчетов удобно использовать единообразную методику для всех периодов водопонижения. Поэтому независимо от гидрогеологических условий самого водоносного пласта водопонижение для котлованов, разрабатываемых способом гидромеханизации, во все периоды рекомендуется рассчитывать по той же методике, что и для котлованов, расположенных в пластах со сложными гидрогеологическими условиями.

В типовых условиях водопонизительные установки рассчитываются в целом, как системы взаимодействующих скважин.

При небольшом числе скважин (порядка до 10 шт.) установку можно рассматривать состоящей из отдельно стоящих взаимо-

действующих скважин, т. е. вести расчет для каждой скважины в отдельности (см. гл. II, § 7, п. *а* и гл. III, § 13, п. *а*).

Однако при большом числе скважин такого рода расчеты оказываются слишком трудоемкими. В этом случае для типовых условий целесообразно переходить к схеме составленного из отдельных прямолинейных участков контура водопонизительной установки, вдоль каждого из которых принимается равномерная расстановка равнодебитных скважин, т. е. устанавливается постоянная интенсивность водоотбора (см. гл. II, § 7, п. *б*, гл. III, § 13, п. *б* и гл. IV, § 19).

В сложных условиях, характерных для крупных котлованов, расчет, как правило, приходится вести не для всей установки в целом, а по отдельным участкам, которые характеризуются однородными гидрогеологическими условиями, причем по контуру установки задаются определенные уровни (понижения) грунтового потока. В частности, когда по всей площади котлована требуется задать постоянный уровень грунтовых вод, то обычно этот же уровень целесообразно задать по всему водопонизительному контуру (методику расчета см. гл. II, п. Б, гл. III, п. Б, гл. IV, § 20).

2. Для выполнения собственно фильтрационных расчетов водопонижения рекомендуется следующий порядок.

Прежде всего намечается проектный вариант водопонизительной установки для основного случая — случая поддержания проектных уровней грунтовых вод в межень (при установившемся режиме фильтрации, см. § 1).

С помощью приближенных приемов оценивается общий приток к водопонизительной установке. Для типовых условий определение общего притока к системе скважин следует выполнять, приведя ее к схеме б о л ь ш о г о к о л о д ц а (гл. II, § 6). Для котлованов, находящихся в сложных условиях, оценку притока следует проводить по отдельным участкам (гл. II, § 8).

По полученному общему и погонному притоку в первом приближении подбирается насосное оборудование и задается число скважин[1], а кроме того, в зависимости от мощности потока под дном котлована принимается степень несовершенства скважин.

Для скважин с глубинными или эжекторными насосами вариант с несовершенными скважинами следует рассматривать в основном для несовершенных котлованов при мощности проницаемых грунтов под дном водоема не менее 15—20 *м* или при ярусном водопонижении. Для легких иглофильтровых установок глубина заложения иглофильтров, а вместе с тем и степень их несовершенства определяется предельной высотой всасывания.

Определив таким образом проектный вариант водопонизительной установки, можно перейти к его более детальному расчету, характер которого уже зависит от типизации по условиям в разрезе котлована.

---

[1] Вопросы подбора насосного оборудования в настоящих указаниях не рассматриваются.

Рассмотрим сначала порядок детализации расчета для водопонизительных установок котлованов, расположенных в однородном по вертикали или приводимом к однородному водоносном пласте (§ 2, п. *а*, схемы 1, 2, 5).

а) Для несовершенного котлована (§ 2, п. *а*, схема 2) определяется понижение грунтовых вод под ним и в характерных скважинах в условиях установившегося режима фильтрации при заданном дебите скважин. Для типовых условий ведется расчет всей установки в целом (гл. II, § 6, 7), а для сложных условий расчет проводится по отдельным участкам водопонизительного контура с использованием сетки движения фильтрационного потока в плане (гл. II, § 8, 9, 10). На основании этих расчетов производится уточнение расстановки основных скважин, а также и окончательный выбор насосного оборудования.

После установления рациональной схемы водопонижения для основного случая следует перейти к поверочным расчетам для случаев первоначальной откачки (гл. III) и поддержания проектных уровней грунтовых вод в паводок (гл. IV).

Оценка общего притока к водопонизительной установке выполняется для котлованов, находящихся в типовых условиях, на основе приведения системы скважин к большому колодцу (гл. III, § 12 и гл. IV, § 19) и для котлованов, находящихся в сложных условиях, на основании расчета по участкам (гл. III, § 14, 15, п. *а* и гл. IV, § 20).

Для случая первоначальной откачки поверочные расчеты для крупных установок далее уточняются. При типовых условиях ведется расчет всей установки в целом (гл. III, § 13). При сложных условиях расчет выполняется по характерным лентам тока, выделенным по сетке движения фильтрационного потока в плане, соответствующим установившемуся режиму, причем здесь используется предположение о недеформируемости линий тока при неустановившемся режиме фильтрации (гл. III, § 14, 15, п. *б*, 16, п. *б*).

б) При водопонижении в котлованах совершенного типа (§ 2, п. *а*, схема 1) следует иметь в виду, что, как это указано выше, котлованы такого рода полностью относятся к котлованам со сложными гидрогеологическими условиями. В связи с этим водопонизительные установки совершенных котлованов рассчитываются только по отдельным участкам (гл. II, § 8, 9; гл. III, § 14, 15; гл. IV, § 20).

Порядок детального расчета аналогичен таковому для установок несовершенных котлованов.

в) При фильтрационных расчетах разгрузки напорных горизонтов (§ 2, п. *а*, схема 5) весьма важным является расчет времени разгрузки в условиях неустановившейся фильтрации (с учетом упругого режима фильтрации).

В хорошо проницаемых (песчаных) грунтах разгрузка напорных горизонтов производится обычно системой небольшого числа

скважин, которые могут рассчитываться, как отдельно стоящие скважины (гл. III, § 17, п. *а*). В слабопроницаемых грунтах приходится переходить к большому числу разгрузочных скважин, группируемых обычно в линейные ряды, причем в связи с небольшим дебитом скважины работают с постоянным понижением (гл. III, § 17, п. *б*).

Аналогичным путем проводятся все фильтрационные расчеты при слоистом сложении откосов и дна котлована (§ 2, п. *а* схемы 3,4). Так, для котлована трехслойного сложения (§ 2, п. *а*, схема 3) расчеты проводятся как по схеме совершенного котлована для верхнего горизонта, так и по схеме несовершенного котлована для нижнего горизонта.

При водопонижении в двуслойной среде (§ 2, п. *а*, схема 4) расчеты скважин в основном горизонте ведутся в том же порядке, что и для несовершенных котлованов. Если оказывается необходимым устройство иглофильтровых установок в верхнем горизонте, то их расчет производится по методике, изложенной в гл. II, § 11.

В заключение настоящего параграфа отметим, что в основу методики построения расчетных зависимостей для контурных систем скважин положен метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений (см. приложение 1).

ГЛАВА ВТОРАЯ

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ВОДОПОНИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ

А. РАСЧЕТ ДЛЯ ТИПОВЫХ УСЛОВИЙ

§ 6. Определение общего притока к водопонизительным установкам

В типовых условиях для определения притока можно пользоваться расчетами по способу большого колодца. Согласно этому способу группа $n_с$ скважин может быть приведена к эквивалентному колодцу, приток к которому будет соответствовать суммарному притоку к группе скважин. Радиус такого колодца $r_к$ в общем случае определяется согласно зависимости

$$\lg r_к = \frac{1}{n_с} \sum_{i=1}^{n_с} \lg r_i \qquad \text{(II, 1)}$$

или

$$r_к = \sqrt[n_с]{r_1 r_2 \ldots r_i \ldots r_{n_с}}, \qquad \text{(II, 1а)}$$

т. е. как среднее геометрическое из расстояний от каждой скважины до центра группы скважин, в котором задается (или определяется) расчетное понижение уровня грунтовых вод.

Для системы большого числа скважин, располагаемых относительно равномерно по определенному контуру, величину $r_к$ можно определить по упрощенной формуле

$$r_к = \sqrt{\frac{F_к}{\pi}}, \qquad \text{(II, 2)}$$

где $F_к$ — площадь, заключенная внутри рассматриваемого контура скважин.

Для сильно вытянутых в плане котлованов (при отношениях бо́льшего размера к меньшему свыше, чем три) величину $r_к$ лучше определять по формуле

$$r_к = \frac{P}{2\pi}, \qquad \text{(II, 2а)}$$

где P — длина водопонизительного контура.

Для прямоугольных в плане котлованов размерами $2A \cdot 2B$ величину $r_к$ рекомендуется определять по формуле [Л. 13]

$$r_к = \eta \frac{A+B}{4}, \qquad \text{(II, 2б)}$$

где η определяется по таблице:

$\frac{B}{A}$	0	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
η	1,0	1,12	1,16	1,18	1,18	1,18

Общий приток Q к водопонизительной установке определяется по следующей единой зависимости:

$$Q = 2{,}73 \frac{kTS}{\lg \frac{R}{r_к}}, \qquad \text{(II, 3)}$$

где S — расчетное понижение в котловане, принимаемое в соответствии с рекомендациями § 3;

R — величина, характеризующая эффективное расстояние до контуров питания и стока.

В табл. II-1 приведены выражения для определения величины R при различных условиях питания.

Таблица II-1

Схема условий питания в плане	Выражения для R	
а) Котлован у реки — рис. 18-*а* (у линейного контура питания)	$R = 2L$	(а)
б) Котлован в углу между двумя контурами питания — рис. 18-*б*	$R = \frac{2LL_1}{\sqrt{L^2 + L_1^2}}$	(б)
в) Котлован в углу между контуром питания и непроницаемой границей рис. 18-*в*	$R = 2L\sqrt{\frac{L^2}{L_1^2} + 1}$	(в)

(Продолжение)

Схема условий питания в плане	Выражения для R
г) Котлован между прямолинейным контуром питания и непроницаемой границей — рис 18-*г*	$R = \frac{4}{\pi} L \operatorname{tg} \frac{\pi l_1}{2L}$ (г)
д) Котлован между двумя прямолинейными контурами питания или стока рис. — 18-*д*	$R = \frac{2}{\pi} L \sin \frac{\pi l_1}{L}$ (д)
е) Котлован в круговой области питания — рис. 18-*е*	$R = R_к - \frac{\delta^2}{R_к}$ (е)

Примечание. Величины L, L_1 и δ отсчитываются от центра большого колодца.

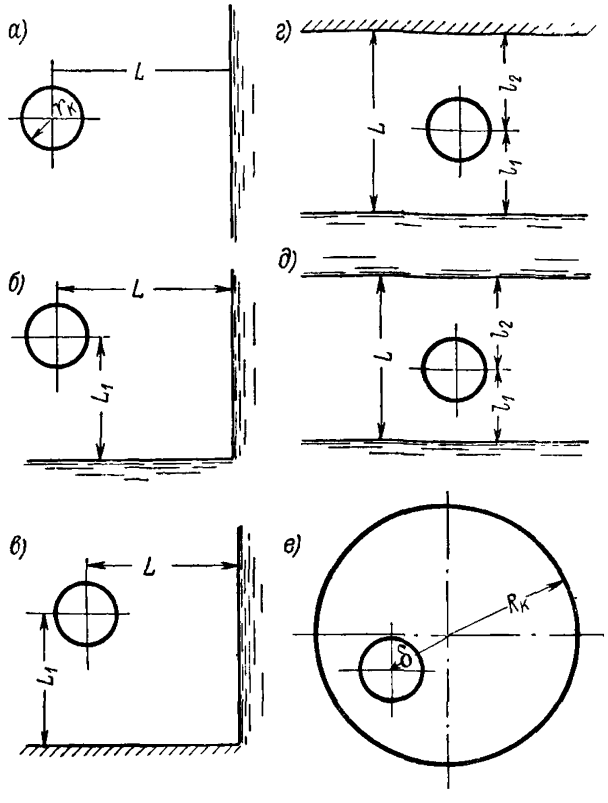


Рис. 18.

Пример расчета. Определим приток к водопонизительной установке, состоящей из шести скважин ($n_с = 6$) и расположенной в междуречном массиве

при $k = 10$ *м/сут*; $T = 18$ *м* и $S_к = 10$ *м* (рис. 19). Другие размеры указаны на том же рисунке.

Проведем расчет без учета влияния удаленной границы питания, т. е. по схеме котлована у линейного контура питания.

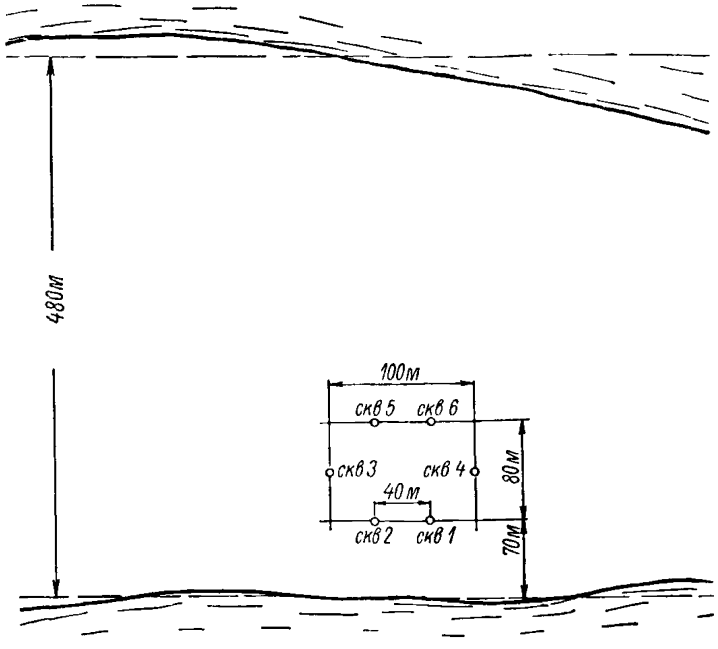


Рис. 19.

Прежде всего определим радиус большого колодца согласно (II, 1а).

$$r_к = \sqrt[6]{(44^2 \times 50)^2} = \sqrt[3]{44^2 \times 50} = 46{,}5 \text{ м}.$$

Выражение для эффективного расстояния R определим по формуле (а) табл. II-1 при $L = 110$ *м* (см. рис. 19)

$$R = 2 \times 110 = 220 \text{ м},$$

а приток Q к установке определим по формуле (II, 3)

$$Q = 2{,}73 \frac{10 \times 18 \times 10}{\lg \frac{220}{46{,}5}} = 7300 \text{ м}^3/\text{сут} = 304 \text{ м}^3/\text{час};$$

дебит одной скважины

$$Q_с = \frac{Q}{n_с} = \frac{7300}{6} = 1216 \text{ м}^3/\text{сут} = 51 \text{ м}^3/\text{час}.$$

С целью проверки влияния удаленной границы питания проведем расчет притока к установке по схеме пласта между двумя областями питания при $L = 480$ *м* и $l_1 = 110$ *м* (см. рис. 19).

По формуле (д) табл. II-1 находим величину R:

$$R = \frac{2}{\pi} 480 \sin \frac{110\pi}{480} = 200 \text{ м}.$$

По формуле (II, 3) находим общий приток к установке

$$Q = 2{,}73 \frac{10 \times 18 \times 10}{\lg \frac{200}{46{,}5}} = 7750 \text{ м}^3/\text{сут} = 323 \text{ м}^3/\text{час}$$

и дебит одной скважины

$$Q_c = \frac{Q}{n_c} = \frac{7750}{6} = 1290 \text{ м}^3/\text{сут} = 54 \text{ м}^3/\text{час}.$$

В данном случае разница в расчетах по различным схемам получилась сравнительно небольшой (~7%).

§ 7. Расчет взаимодействующих скважин

а. Системы отдельно стоящих скважин

При небольшом числе водопонизительных скважин они рассматриваются как система отдельно стоящих скважин.

В этом случае расчетное понижение уровня грунтовых вод S при действии одиночной скважины определится общей зависимостью

$$S = \frac{Q_c}{kT} f_c, \qquad \text{(II, 4)}$$

где f_c — функция понижения от действия одиночной скважины характеризующая эффективность ее работы.

При действии системы n_c одиночных скважин общее расчетное понижение определяется как сумма расчетных понижений от действия каждой скважины в отдельности, т. е.

$$S = \sum_{i=1}^{n_c} S_i = \frac{1}{kT} \sum_{i=1}^{n_c} Q_c f_c, \qquad \text{(II, 5)}$$

причем при одинаковых дебитах скважин

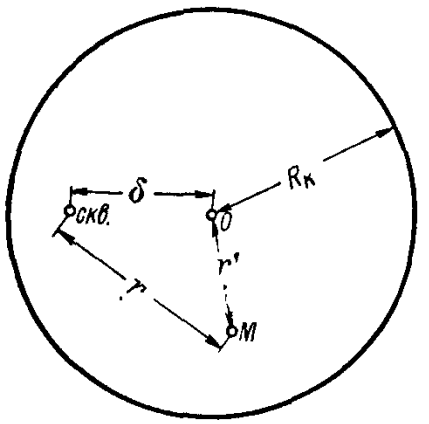
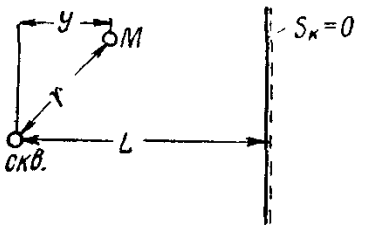
$$S = \frac{Q_c}{kT} (f_c^{(1)} + f_c^{(2)} + \ldots + f_c^{(n_c)}) = \frac{Q_c}{kT} f_{\text{сум}}, \qquad \text{(II, 6)}$$

где $f_{\text{сум}}$ — суммарная функция понижения системы.

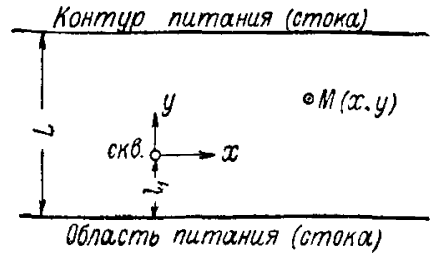
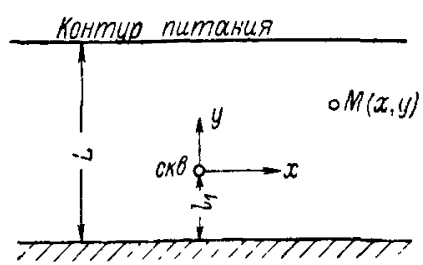
Формулы для определения величин f_c приведены в табл. II-2.

Для равнодебитных скважин при близком расположении их друг к другу (по крайней мере, когда половина наибольшего расстояния между скважинами меньше их среднего расстояния

Таблица II-2

№ схемы	Наименование схемы расположения скважины	Изображение схемы	Выражение для функции понижения
1	В круговом контуре питания		Вне скважины [Л. 29] $f_c = 0{,}367 \lg \frac{\sqrt{R_к^2 + \frac{(r')^2 \delta^2}{R_к^2} - \delta^2 + r^2}}{r}$ В скважине $f_c = 0{,}367 \lg \frac{R_к^2 - \delta^2}{R_к r_c}$
2	В полуограниченном пласте с одним контуром питания (стока)		Вне скважины [Л. 27] $f_c = 0{,}367 \lg \frac{\sqrt{4L^2 - 4Ly + r^2}}{r}$ (y положительно, если точка M находится между скважиной и рекой) В скважине $f_c = 0{,}367 \lg \frac{2L}{r_c}$

Продолжение

№ схемы	Наименование схемы расположения скважины	Изображение схемы	Выражение для функции понижения
3	В полосообразном пласте с двумя контурами питания (стока)		Вне скважины [Л. 26] $f_c = 0{,}183 \lg \left[\frac{\mathrm{ch}\frac{\pi x}{L} - \cos\frac{\pi(2l_1 + y)}{L}}{\mathrm{ch}\frac{\pi x}{L} - \cos\frac{\pi y}{L}} \right]$ В скважине $f_c = 0{,}367 \lg \left[\frac{2L}{\pi r_c} \sin\frac{\pi l_1}{L} \right]$
4	В полосообразном пласте с одним контуром питания и одним непроницаемым контуром		Вне скважины [Л. 15] $f_c = 0{,}183 \lg \frac{(\mathrm{ch}\alpha + \cos\beta_1)(\mathrm{ch}\alpha + \cos\beta_2)}{(\mathrm{ch}\alpha - \cos\beta_1)(\mathrm{ch}\alpha - \cos\beta_2)}$ $\alpha = \frac{\pi x}{2L}$; $\beta_1 = \frac{\pi(l_1 + y)}{2L}$; $\beta_2 = \frac{\pi(l_1 - y)}{2L}$ В скважине $f_c = 0{,}367 \lg \left[\frac{4L}{\pi r_c} \mathrm{ctg}\frac{\pi l_1}{2L} \right]$

до контура питания) величину $f_{сум}$ приближенно можно определять по формуле

$$f_{сум} = n_с f_с^э, \qquad (II, 7)$$

где $f_с^э$ — осредненная (эффективная) величина функции понижения, определяемая по формулам для функции понижения в скважине (см. табл. II-2) с заменой радиуса скважин на эффективное расстояние $r_э$ от скважин до расчетной точки. Величина $r_э$ определяется так же, как радиус большого колодца $r_к$, по формуле (II, 1), а расчетное расстояние до ближайшего контура питания или стока принимается равным среднему расстоянию до него от центра системы и от расчетной скважины.

При расчетах понижения в скважинах целесообразно выделить функцию понижения самой скважины $f_{скв}$ и считать

$$f_{сум} = f_{скв} + (n_с - 1) f_с^э, \qquad (II, 7а)$$

где $f_с^э$ — эффективная функция понижения, определяемая от действия всех скважин, кроме расчетной.

Пример расчета. Проведем расчет понижения уровня в скважине для примера, рассмотренного в предыдущем параграфе.

Приток ко всей системе из шести скважин был определен в 7750 *м³/сут*, откуда дебит каждой скважины составляет $Q_с = 1290$ *м³/сут* = 54 *м³/час*.

В наихудших условиях с точки зрения возможного перепонижения уровня находятся скважины 4 и 5. Проведем расчет для скважины 5 при $r_с = 0{,}15$ *м*.

Определим функцию понижения от самой скважины, пользуясь табл. II-2 (схема 3), при $l_1 = 150$ *м*.

$$f_{скв} = 0{,}367 \lg \frac{2 \cdot 480}{3{,}14 \cdot 0{,}15} \sin\left(\frac{3{,}14 \cdot 150}{480}\right) = 1{,}21.$$

Определяем эффективный радиус $r_э$ по формуле (II, 1) при $n_с = 5$ (от всех скважин, кроме расчетной)

$$\lg r_э = \frac{1}{5}(\lg 80 + \lg 89{,}5 + \lg 80 + \lg 40 + \lg 52) = 1{,}854; \quad r_э = 71{,}5 \text{ м}$$

и расчетное расстояние от скважин до реки l_1.

$$l_1 = \frac{110 + 150}{2} = 130 \text{ м}.$$

Находим теперь $f_с^э$ по той же формуле (II, 1а) табл. II-2, но заменяя $r_с$ на $r_э$.

$$f_с^э = 0{,}367 \lg \frac{2 \cdot 480}{3{,}14 \cdot 71{,}5} \sin \frac{3{,}14 \cdot 130}{480} = 0{,}186.$$

Суммарная функция понижения $f_{сум}$ определяется согласно (II, 7а)

$$f_{сум} = 1{,}21 + 5 \cdot 0{,}186 = 2{,}14.$$

По формуле (II, 6) находим понижение в скважине при $Q_с = 1290$ *м³/сут*

$$S_с = \frac{1290}{10 \cdot 18} 2{,}14 = 15{,}3 \text{ м}.$$

б. Расчет составного водопонизительного контура

При большом числе водопонизительных скважин целесообразно воспользоваться методикой расчета, основанной на приведении системы скважин к составному водопонизительному контуру, состоящему из ряда прямолинейных участков, вдоль каждого из которых принимается равномерная расстановка скважин равной производительности [Л. 30, 31, 33].

Расчетное понижение S внутри котлована от действия одного участка контура определится уравнением

$$S = \frac{Q}{kT} f = \frac{Q_c}{kT} n_c f, \qquad \text{(II, 8)}$$

где f — функция понижения участка контура, характеризующая его эффективность. Функция понижения f зависит от длины участка, размеров и формы области питания и от фильтрационной неоднородности потока.

Используя метод фильтрационных сопротивлений (см. приложение 1), запишем формулу для определения понижения у стенки совершенной скважины

$$S_c = \frac{Q}{kT}\left(f + \frac{1}{n_c} \Phi_к \right) = \frac{Q_c}{kT} (n_c f + \Phi_к), \qquad \text{(II, 8а)}$$

где $\Phi_к$ — внутреннее сопротивление контура скважин. Для определения величины $\Phi_к$ следует пользоваться номограммой рис. 67 (приложение 1).

Приведенные зависимости применимы для каждого участка в отдельности. Для всей водопонизительной установки, состоящей из n участков, расчетное понижение внутри котлована определится суммированием понижений от каждого участка в отдельности

$$S = \frac{Q_c}{kT} \sum_{i=1}^{n} n_{ci} f_i, \qquad \text{(II, 9)}$$

где $n_{ci} f_i$ — произведение числа скважин и функции понижения на участке номер i.

Если удельные дебиты нескольких линий равного притока принимаются одинаковыми, то удобно пользоваться формулой

$$S = \frac{q}{kT} \bar{f}_0, \qquad \text{(II, 9а)}$$

где

$$\bar{f}_0 = \sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{q} 2 l_i f_i. \qquad \text{(II, 9б)}$$

Здесь q_i — удельный дебит i-ой линии равного притока; q — выбранный расчетный удельный дебит.

Уравнение (II, 9) является основной расчетной зависимостью, пользуясь которой можно осуществить подбор рациональной схемы расположения водопонизительных скважин и определить приток к ним. Это уравнение записано в предположении, что все скважины оборудованы одинаковыми насосами и, следовательно, являются равнодебитными. В этом предположении и следует производить основную часть расчета, которая сводится к подбору числа скважин n_{cl} на различных участках. Далее может оказаться целесообразным изменить насосное оборудование на отдельных участках. Тогда следует заменить n_c скважин с дебитом Q_c на n_c' скважин с дебитом Q'_c, сохраняя неизменным общий приток к участку скважин, т. е. соблюдая соотношение

$$n_c Q_c = n_c' Q'_c \text{ или } n_c' = n_c \frac{Q_c}{Q_c'}. \qquad \text{(II, 10)}$$

Для определения понижения в скважине участка номер i следует пользоваться общим уравнением

$$S_c = \frac{Q_c}{kT} \sum_{i=1}^{n} n_{cl} f_l + \frac{Q_{ci}}{kT} \Phi_к^{(i)}. \qquad \text{(II, 11)}$$

В уравнении (II, 11)

Q_{ci} — дебит скважин на расчетном участке;

Q_c — как и ранее, выбранный расчетный дебит скважин;

n_c — число скважин, подобранных при одинаковом дебите скважин Q_c.

Если удельные дебиты нескольких линий равного притока одинаковы, то

$$S_c = \frac{q}{kT} \bar{f}_0 + \frac{Q_{ci}}{kT} \Phi_{кi}. \qquad \text{(II, 11а)}$$

Для проведения расчетов по уравнениям (II, 9) и (II, 11) необходимо прежде всего определить функцию понижения от действия линии равного притока.

Ее выражение можно представить в следующем виде [Л. 31]:

$$f = f_c - \Delta f, \qquad \text{(II, 12)}$$

где величина f_c представляет собой функцию понижения для одиночной скважины, в середине линии определяемую по данным табл. II-2, а величина Δf характеризует различие в работе скважины и линии равного притока и определяется по формуле

$$\Delta f = 0{,}367 \lg \frac{r_0}{r}, \qquad \text{(II, 13)}$$

причем r_0 — расчетное расстояние от точки до линии;

r — расстояние от середины линии до точки, в которой производится расчет.

Величину r_0 можно определить по графику рис. 20-*а* в зависимости от r и кратчайшего расстояния точки до линии Δ[1]. (Последнее определяется как длина перпендикуляра MM'—рис. 20-*б*, если этот перпендикуляр своим основанием попадает на линию. В противном случае Δ определяется как расстояние до ближайшей точки линии).

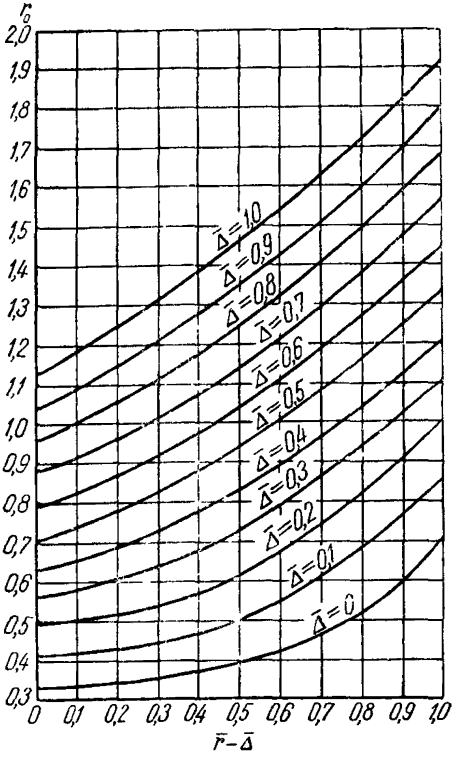


Рис. 20-*а*.

При $\bar{\Delta} \geqslant 1$ величину Δf можно найти по нижеследующей таблице; при $\bar{\Delta} \geqslant 3$ можно принимать $\Delta f = 0$.

При определении f в середине линии (где $r = 0$) следует найти f_c, как для скважины, заменяя только r_c на $0{,}37l$, а Δf принять равной нулю.

Расчет величины f по формуле (II, 12) справедлив при расположении линии на расстоянии от контура питания (реки), большем половины длины линии, что обычно и имеет место. В про-

---

[1] Для удобства использования графика в нем приведена зависимость $\frac{r_0}{l}$ от $\bar{r} - \bar{\Delta} = \frac{r-\Delta}{l}$ при различных $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{l}$.

$\frac{r}{\Delta}$	0	0,25	0,5	0,75	1,0
1	0,019	0,005	0,001	—0,004	—0,007
2	0,005	0,003	0	—0,001	—0,002
3	0,002	0,001	0	0	—0,001

тивном же случае к величине f, определяемой по формуле (II, 12), следует добавить величину $\Delta f'$, определяемую так же, как и величина Δf по формуле (II, 13) и по вышеприведенной таблице, но от действия фиктивной линии, представляющей собой зеркальное отображение действительной линии относительно контура питания (реки).

Рекомендуется следующий порядок расчета составных водопонизительных установок:

а) Задаются расчетные точки, для которых должны быть определены уровни грунтового потока внутри котлована и по контуру установки, а весь водопонизительный контур разбивается на ряд участков с постоянной интенсивностью водоотбора.

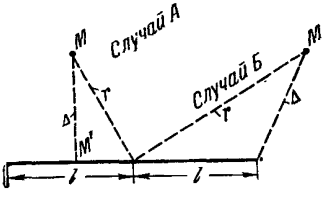


Рис. 20-*б*.

Внутри котлована, как правило, следует задавать не более 2—3 расчетных точек; по контуру котлована желательно иметь расчетные точки на каждом участке или хотя бы на характерных участках (например, на самом дальнем и самом близком от области питания).

б) По формуле (II, 12) определяются функции понижения в расчетных точках.

в) По способу большого колодца (§ 5) оценивается величина притока к установке. При этом величину $r_к$ можно определять по формулам (II, 2).

г) На основании данных о величине притока выбирается насосное оборудование, его производительность и в первом приближении определяется требуемое число скважин.

д) По формуле (II, 9) определяется величина расчетного понижения в расчетных точках внутри котлована, которое сопоставляется с величиной требуемого понижения. В случае заметного расхождения этих величин производится изменение расстановки скважин (а иногда и изменение насосного оборудования) и проводится расчет во втором приближении, а в дальнейшем, если это необходимо, то и в третьем. Обычно двух-трех приближений бывает вполне достаточно.

е) После подбора рациональной расстановки скважин на типовых участках контура по формуле (II, 11) проверяются уровни в скважинах, с тем чтобы избежать в них излишнего понижения уровней. Если на каких-то участках отмечается нежелательное или недопустимое понижение уровня в скважинах, то следует либо произвести перестановку скважин, либо перейти на этих участках на насосное оборудование меньшей производительности, увеличивая соответственно число скважин.

Пример расчета. Рассмотрим в качестве примера прямоугольную установку вблизи реки (рис. 21), закладываемую в достаточно однородном безнапорном потоке с $k = 25$ *м/сут*, при начальной глубине потока $h_0 = 21{,}0$ *м* и требуемом понижении $S_0 = 10{,}0$ *м*.

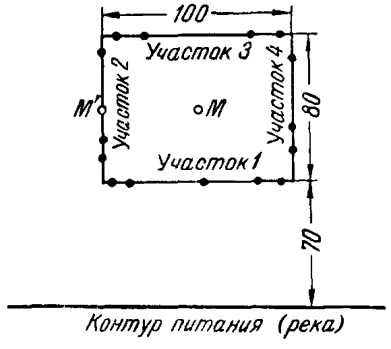


Рис. 21.

Для обеспечения равномерности понижения в котловане задается условие, что понижение в середине линии 2 (расчетная точка M') было одинаково с понижением в центре контура (расчетная точка M).

Оценим общий приток к установке по способу большого колодца, определяя его радиус по формуле (II, 2)

$$r_к = \sqrt{\frac{80 \cdot 100}{3{,}14}} = 50{,}4 \text{ м}.$$

Определяем расчетное значение понижения S по формуле (I, 3), задаваясь $T = 16$ *м*

$$S = \frac{2 \cdot 21 - 10}{2 \cdot 16} 10 = 10 \text{ м}.$$

Как видно, при выбранном значении T расчетное понижение равно действительному.

По формуле (II, 3) при $R = 2 \cdot 110 = 220$ (см. табл. II-1а) находим

$$Q = \frac{2{,}73 \cdot 25 \cdot 16 \cdot 10}{\lg \frac{220}{50{,}4}} = 17000 \text{ м}^3/\text{сут} = 710 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Выбирая насос АТН-8 с производительностью 30 *м³/час*, определяем потребное число скважин n_c

$$n_c = \frac{Q}{Q_c} = \frac{710}{30} = 24 \text{ шт.}$$

Перейдем теперь к рассмотрению вопроса о рациональной расстановке скважин, исходя из условия равенства понижений в точках M и M'.

Приведем подробное определение функций понижения f' в точке M' от действия линий *1*, *2* и *4*.

Для линии *1* определим прежде всего по схеме 2 табл. II-2 функцию понижения f_c для одиночной скважины в середине линии при $L = 70$ *м*, $r = 64$ *м*, $y = -40$ *м*

$$f_c = 0{,}367 \lg \frac{\sqrt{4 \cdot 70^2 + 4 \cdot 70 \cdot 40 + 64^2}}{64} = 0{,}367 \lg \frac{187}{64} = 0{,}170.$$

При кратчайшем расстоянии от линии до точки $M'\Delta = 40$ *м* и половине длины линии $l = 50$ *м* находим $\bar{\Delta} = 0{,}8$, затем $\bar{r} = 1{,}28$ и $r - \bar{\Delta} = 0{,}48$, а по графику рис. 20-*а* определяем $\bar{r}_0 = 1{,}24$.

Тогда согласно (II, 13)

$$\Delta f = 0{,}367 \lg \frac{\bar{r}_0}{\bar{r}} = 0{,}367 \lg \frac{1{,}24}{1{,}28} = -0{,}005$$

и функция понижения f от действия линии согласно (II, 12) будет

$$f = 0{,}170 + 0{,}005 = 0{,}175.$$

Аналогичным путем находим величину f_c для линии *4* при $L = 110$ *м*, $r = 100$ *м*, $y = 0$

$$f_c = 0{,}367 \lg \frac{\sqrt{4 \cdot 110^2 + 100}}{100} = 0{,}141.$$

Далее при $\Delta = 100$ *м*, $l = 40$ *м* получаем $\bar{\Delta} = 2{,}5$ и находим по таблице $\Delta f = 0{,}003$, откуда

$$f = 0{,}141 - 0{,}003 = 0{,}138.$$

Величину f от действия линии *2*, на середине которой располагается расчетная точка M', определяем по схеме 2 табл. II-2, подставляя туда вместо r_c величину $0{,}37l$,

$$f = 0{,}367 \lg \frac{2 \cdot 110}{0{,}37 \cdot 40} = 0{,}430.$$

Подсчитанные таким образом значения функций понижения для точек M и M' сведены в нижеследующую таблицу, в которой приведено также предварительное распределение скважин по отдельным участкам (линиям).

Распределим в первом приближении скважины по отдельным участкам следующим образом (здесь же для удобства выписаны функции понижения):

Участок		1	2	3	4	$f_{сум} = \sum_{i=1}^{n} n_c f$
Число скважин		7	6	5	6	
Функции понижения:	точка M	0,213	0,224	0,257	0,224	5,48
	точка M'	0,168	0,430	0,225	0,138	5,71

Определим теперь понижения в расчетных точках по формуле (II, 9) при $Q_c = 30$ *м³/час* $= 720$ *м³/сут*.

В точке M

$$S = \frac{720}{25 \cdot 16} 5{,}48 = 9{,}9 \text{ м}.$$

В точке M'

$$S = \frac{720}{25 \cdot 16} 5{,}71 = 10{,}3 \text{ м}.$$

По существу говоря, расчет показывает, что принятая расстановка скважин решает поставленную задачу. Однако несколько лучшие результаты даст перестановка по одной скважине с участков 2 и 4 на участок 3. В этом случае получится

$$f_{\text{сум}} = 5{,}55 \text{ и } S = \frac{720}{400} 5{,}55 = 10{,}0 \text{ м}.$$

В точке M'

$$f_{\text{сум}} = 5{,}59 \text{ и } S = \frac{720}{400} 5{,}59 = 10{,}1 \text{ м}.$$

Таким образом, наилучшей с точки зрения поставленной задачи оказывается нижеследующая расстановка скважин:

Участок	1	2	3	4
Число скважин	7	5	7	5

Определим теперь уровень в скважине на участке 2, принимая $f_{\text{сум}}$, как для точки M', а диаметр скважин 0,3 м.

Учитывая, что $\sigma = \frac{80}{5} = 16$ м, по номограмме рис. 67 при $\frac{\sigma}{d_c} = \frac{16}{0{,}3} = 53$ находим $\Phi_к = 0{,}45$.

Тогда согласно (II, 11)

$$S_c = \frac{720}{400}(5{,}59 + 0{,}45) = 10{,}9 \text{ м}.$$

Б. РАСЧЕТ ВОДОПОНИЗИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ПИТАНИЯ

§ 8. Оценка притока к водопонизительной установке

Для установок, находящихся в сложных условиях питания, основным способом расчета притока является получивший широкое распространение на практике способ расчета по участкам. Этот способ сводится к тому, что весь контур водопонижения разбивается на отдельные участки, как бы разделенные между собой непроницаемыми стенками, причем в пределах каждого из этих участков гидрогеологические условия принимаются одинаковыми. Вместе с тем на водопонизительном контуре задаются определенные уровни грунтовых вод, соответствующие уровням в котловане вблизи данного участка.

Способ расчета по участкам в его непосредственном виде можно употреблять для ориентировочных расчетов притока

к котловану. В этом случае приток к каждому участку $Q_{уч}$ определяется по формуле

$$Q_{уч} = (kT)_{ср} \frac{S_{ср}}{L_{ср}} b_{уч}, \qquad \text{(II, 14)}$$

где $(kT)_{ср}$ — средняя проводимость потока в пределах рассматриваемого участка;

$S_{ср}$ — среднее расчетное понижение между уровнем на контуре питания и уровнем в котловане в пределах рассматриваемого участка;

$L_{ср}$ — среднее расстояние от участка контура водопонижения до контура питания;

$b_{уч}$ — длина рассматриваемого участка.

Для однородного безнапорного потока величину притока лучше определять по формуле

$$Q_{уч} = k_{ср} \frac{h_к^2 - h_л^2}{2L_{ср}} b_{уч}, \qquad \text{(II, 14а)}$$

где $h_к$ — глубина потока на контуре питания;

$h_л$ — глубина потока в котловане в пределах рассматриваемого участка.

Для однородно-слоистых потоков также следует пользоваться формулой (II, 14а), определяя только расчетные глубины потока $h_к$ и $h_л$ согласно (I, 5), (I, 5а). Общий приток к контуру водопонижения определится суммированием притоков к отдельным его участкам.

Для совершенного котлована при однородном сложении откоса и близком расположении скважин к откосам величину притока можно оценить, приводя котлован к большому колодцу (см. § 6), радиус которого $r_к$ определяется по формуле (II, 2а), где в качестве F принимается площадь котлована, оконтуренная скважинами (иглофильтрами) у откоса.

§ 9. Методика расчета систем скважин

Для расчетов эффективности водопонижения в сложных условиях можно пользоваться способом расчета по характерным лентам тока, который является дальнейшим развитием способа расчета по участкам.

Способ расчета по лентам тока заключается в том, что на водопонизительном контуре выделяется ряд характерных мест, от которых к области питания проводятся ленты тока (образуемые двумя линиями тока), причем считается, что конфигурация этих лент тока пренебрежимо мало меняется в зависимости от количества скважин водопонизительной установки и определяется очертанием контура последней. Такая постановка задачи дает

возможность сравнительно просто строить ленты тока, используя графический метод, а в сложных случаях применяя метод ЭГДА.

При построении ленты тока графическим методом одновременно строятся в ее пределах линии равного понижения с интервалом 20% от полного падения уровней потока вдоль ленты тока. При использовании метода ЭГДА прежде всего строятся линии равного понижения (равного потенциала) через 20% от максимального понижения, по которым на основании принципа ортогональности сетки движения строятся отдельные ленты тока (см. приложение 2). Таким образом, вся лента тока разбивается на отдельные отсеки, ограниченные линиями равного понижения (эквипотенциалями).

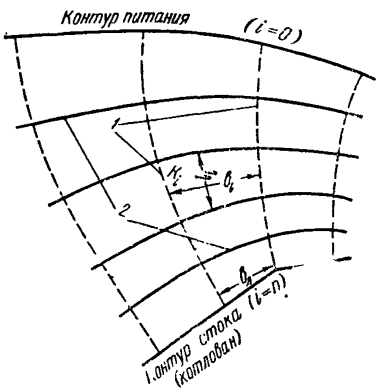


Рис. 22.

Далее по каждой ленте тока поток приводится к эквивалентному линейному в плане потоку с постоянным k по его длине. Расчетная длина $L_л$ такого эквивалентного потока, разделенного на δ отсеков, определится как сумма приведенных длин l_i^0 каждого участка

$$L_л = \sum_{i=1}^{\delta} l_i^0 . \qquad \text{(II, 15)}$$

В общем случае

$$l_i^0 = \frac{kT}{k_i T_i} \frac{b_л}{b_i} l_i , \qquad \text{(II, 15а)}$$

причем $k_i T_i$ представляет собой проводимость в отсеке номер i, а kT — выбранную расчетную проводимость. Величины b_i и l_i представляют собой ширину и длину отсека номер i, а $b_л$ — расчетную ширину приведенной ленты тока, которую целесообразно принимать равной ширине ленты тока у водопонизительного контура (рис. 22).

Для однородного или однородно-слоистого безнапорного потока в формуле (II, 15а) следует принять $\frac{k_i T_i}{kT} = 1$. Для безнапорных потоков, однородных по высоте, следует в общем случае (при переменном k) принимать $T_i = T$.

Для совершенных котлованов в качестве области стока обычно следует принимать контур котлована, так как его положение,

по существу говоря, определяет характер фильтрационного потока к водопонизительной установке. Полная длина потока $L_л$ при этом определяется по формулам (II, 15) при $\frac{T_l}{T} = 1$, а расстояние от линии скважин до котлована l_2 определяется по формуле

$$l_2 = \bar{S} L_л, \qquad \text{(II, 16)}$$

где $\bar{S}$ — относительное понижение, определяемое по ленте тока в месте расположения линии скважин[1]. При близком расположении линии скважин к котловану в качестве расчетного можно брать действительное расстояние между ними.

После приведения потока по ленте тока к эквивалентному линейному дальнейший фильтрационный расчет эффективности водопонижения проводится по зависимостям для линейных в плане потоков, как для бесконечных рядов скважин.

§ 10. Расчет водопонижения в условиях линейных в плане потоков

Как указывалось выше, к схеме линейных потоков приводятся сложные схемы потоков при расчетах по отдельным лентам тока.

Методику расчета такого рода потоков рассмотрим отдельно для несовершенных и совершенных котлованов.

а. Расчет для несовершенных котлованов

Для несовершенных котлованов наиболее характерными являются однорядная и двухрядная схемы расположения скважин вдоль контура котлована при одинаковом понижении в котловане.

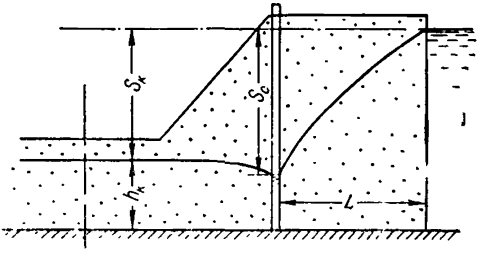


Рис. 23.

Для однорядной схемы (рис. 23) дебит Q_c каждой скважины ряда будет [Л. 29]

$$Q_c = \frac{kTS_к}{L}\sigma, \qquad \text{(II, 17)}$$

где $S_к$ — расчетное понижение уровня грунтовых вод в котловане относительно уровня воды у контура питания.

[1] $\bar{S} = 0$ — на контуре стока, $\bar{S} = 1$ — на контуре питания.

Расчетное понижение уровня в скважинах S_c будет

$$S_c = S_к + \frac{Q_c}{kT} \Phi_к, \qquad \text{(II, 18)}$$

где $\Phi_к$ — внутреннее сопротивление контура скважин, определяемое по номограмме рис. 67. Для безнапорных потоков в качестве T можно принимать $h_л$.

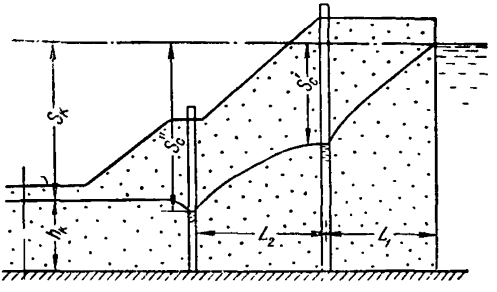


Рис. 24.

Расчетное понижение уровня S в области между контуром питания и водопонизительным контуром определится уравнением

$$S = S_к \left(1 - \frac{x}{L}\right), \qquad \text{(II, 19)}$$

где расстояние x отсчитывается от водопонизительного контура.

Для двухрядной схемы (рис. 24) дебит каждой скважины 1-го ряда Q_c' будет

$$Q_c' = \frac{S_c' - S_к \dfrac{L_1}{L}}{\dfrac{L_1 L_2}{\sigma L} + \Phi_{к_1}}; \quad L = L_1 + L_2, \qquad \text{(II, 20)}$$

где S_c' — расчетное понижение в скважинах 1-го ряда.

Дебит скважины 2-го ряда Q_c'' будет

$$Q_c'' = kT \frac{S_к}{L} \sigma_2 - Q_c' \frac{L_1}{L} \frac{\sigma_2}{\sigma_1}. \qquad \text{(II, 21)}$$

Понижение в скважинах 2-го ряда S_c'' определится по формуле

$$S_c'' = S_к + \frac{Q_c''}{kT} \Phi_{к_2}. \qquad \text{(II, 22)}$$

Здесь $\Phi_{к_1}$ и $\Phi_{к_2}$ — внутренние сопротивления контура соответственно 1-го и 2-го ряда скважин, определяемые по номограмме рис. 67. Для безнапорных потоков в (II, 22) можно принимать $T = h_л$.

б. Расчет для совершенных котлованов

Специфической особенностью работы водопонизительной установки вблизи откоса совершенного котлована (рис. 25-*а*) является наличие проскока грунтовых вод по кровле водоупорного слоя и выход их на откос вблизи точки *A*. В этом случае в задачу воздействия водопонизительной установки следует ставить не полный перехват грунтового потока (что принципиально невозможно),

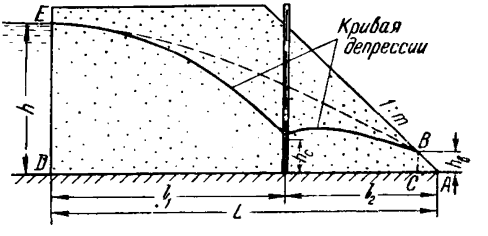


Рис. 25-*а*.

а обеспечение условий, при которых на откос котлована выходил бы такой фильтрационный расход, который являлся допустимым с точки зрения организации и производства общестроительных работ.

Для правильного инженерного решения этой задачи необходимо связать дебит водопонизительных скважин $Q_с$ с погонным расходом фильтрационного потока q_0, выходящего на откос, и высотой высачивания этого потока $h_в$.

При наличии одного ряда скважин или иглофильтров для расчета дебита скважин $Q_с$ можно пользоваться формулой

$$Q_с = k \frac{h^2 \frac{l_2}{L} - h_с^2}{\frac{2l_1 l_2}{\sigma L} + 2\Phi_к}, \qquad \text{(II, 23)}$$

полученной из решения для ряда скважин между двумя областями питания или стока [Л. 26].

В практических расчетах обычно приходится задаваться дебитом скважины (производительностью насосов) $Q_с$. Тогда формулу (II, 23) удобнее решить относительно σ и представить в виде

$$\sigma = 2\frac{Q_с}{k} \frac{l_1}{h^2 - \frac{L}{l_2} h_с^2 - 2\frac{Q_с}{k}\frac{L}{l_2}\Phi_к}. \qquad \text{(II, 23а)}$$

Величина σ находится подбором при заданном значении Q_c.

Можно ограничиться одним приближением, задавая при определении $\Phi_к$ величину σ, определяемую по формуле

$$\sigma = 2\frac{Q_c}{k}\frac{l_1}{h^2 - \frac{L}{l_2}h_c^2}. \qquad \text{(II, 23б)}$$

Согласно тому же решению погонный расход потока q_0, выходящего на откос, будет равен

$$q_0 = k\frac{h^2}{2L} - Q_c\frac{l_1}{\sigma L}. \qquad \text{(II, 24)}$$

Величина участка высачивания на откос $h_в$ может быть определена по формуле Г. К. Михайлова [Л. 18]:

$$h_в = (m + 0{,}5)\frac{q_0}{k}. \qquad \text{(II, 25)}$$

Приведем также решение для двухрядной схемы расположения скважин (рис. 25-*б*). В названной схеме чаще всего встре-

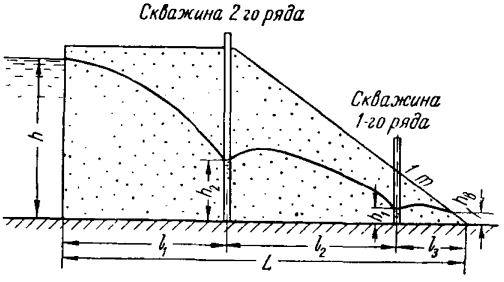


Рис. 25-*б*.

чается сочетание внутреннего ряда иглофильтров с внешним рядом глубинных скважин.

В этом случае заданными обычно являются: для внутреннего ряда — расстояния между скважинами (иглофильтрами) σ_1 и уровень в них h_1; для внешнего ряда — дебит скважин Q_2 (определяемый производительностью выбранных насосов) и уровень в них h_2. Соответственно подлежат определению: дебит скважин внутреннего ряда Q_1 и расстояние между скважинами внешнего ряда σ_2.

Для их определения можно пользоваться следующими зависимостями

$$\sigma_2 = 2\frac{Q_2}{k}\frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2}\frac{1}{h^2\dfrac{l_2}{l_1+l_2} + h_1^2\dfrac{l_1}{l_1+l_2} - h_2^2 - 2\dfrac{Q_2}{k}\Phi_{к_2}}, \qquad \text{(II, 26)}$$

$$Q_1 = \frac{0{,}5k\left(h^2 - h_1^2\dfrac{L}{l_3}\right) - \dfrac{Q_2}{\sigma_2}l_1}{l_1 + l_2 + \sigma_1\dfrac{L}{l_3}\Phi_{к_1}}\sigma_1,$$

где $\Phi_{к_1}$ и $\Phi_{к_2}$ — представляют собой внутренние сопротивления контура соответственно 1-го и 2-го ряда, определяемые по номограмме рис. 67 (приложение 1), причем для определения $\Phi_{к_2}$ в формуле (II, 26) принимается величина σ_2, определяемая предварительно по той же формуле (II, 26) при $\Phi_{к_2} = 0$.

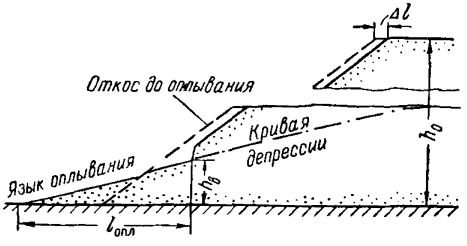


Рис. 26.

Погонный расход потока, выходящего на откос котлована q_0, для этой схемы определится по формуле

$$q_0 = k\frac{h_1^2 + 2\dfrac{Q_1}{k}\Phi_{к_1}}{2l_3}, \qquad \text{(II, 27)}$$

а высота участка высачивания — по формуле (II, 25).

При выборе мощности водопонизительных установок в условиях, когда имеет место проскок потока на откос, следует опираться на определенные, выбранные величины участков высачивания потока на откосе.

Выбирать же расчетное значение участка высачивания нужно исходя из условий фильтрационной устойчивости откосов, причем подход к решению этой задачи несколько различается в зависимости от того, защищается ли откос фильтрующей пригрузкой или остается открытым.

Приведем практические рекомендации для характерных условий, когда фильтрующий откос сложен из песка.

В случае, если песчаный откос котлована отстается незащищенным, интенсивность водопонижения должна определяться таким образом, чтобы длина оплывшей части $l_{опл}$ (рис. 26) была с технической и производственной точки зрения допустимой.

Оплывание откоса происходит под действием фильтрационных и гидродинамических сил стекающего по откосу потока. Показателем размера оплывания откоса является средний уклон I_c, причем

$$I_c = \frac{h_в}{l_{опл}} \text{ или } l_{опл} = \frac{h_в}{I_c}. \qquad \text{(II, 28)}$$

Величина I_c определяется [Л. 32] зависимостью

$$I_c = 0{,}5\,\chi \operatorname{tg}\varphi, \qquad \text{(II, 29)}$$

где величина χ отражает влияние стекающего по откосу потока. При $q_0 < 7$ *м*^{2}/*сут* стекающий по откосу поток имеет ламинарный режим и величина χ определяется по табл. II-3, где

$$\lambda = \frac{\sqrt[3]{q_0}}{d_{50}}. \qquad \text{(II, 30а)}$$

Таблица II-3

λ	0	20	50	100	150	200
χ	1,00	0,75	0,49	0,80	0,21	0,16

Примечание. q_0 дано в *м*^{2}/*сут*, а d_{50} в *см* (*м*^{3}/*сут*·*м*=*м*^{2}/*сут*. В дальнейшем принята размерность *м*^{2}/*сут*).

При $q_0 > 7$ *м*^{2}/*сут* стекающий по откосу поток имеет турбулентный режим, и величина χ определяется по табл. II-4, где

$$\lambda = \sqrt{\frac{q_0}{3d_{50} + 0{,}05}}. \qquad \text{(II, 30б)}$$

Таблица II-4

λ	0	2	5	10	15
χ	1,00	0,91	0,66	0,31	0,16

Примечание. q_0 дано в *м*^{2}/*сут*, d_{50} в *см*.

Определив таким образом значение χ, находим расчетную величину I_c по формуле (II, 29). Далее, определив расчетную величину заложения m по формуле[1]

$$m = \frac{5}{\operatorname{tg}\varphi + 3I_c}, \qquad \text{(II, 31)}$$

находим величину участка $h_в$ по формуле (II, 25).

Длина оплывшей части $l_{опл}$ легко определяется согласно (II, 28).

Если размер оплывания оказывается недопустимым, то необходимо либо уменьшить поступающий на откос расход q_0 введе-

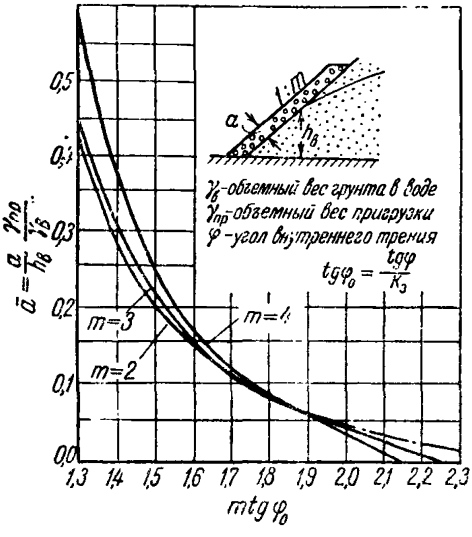


Рис. 27.

нием дополнительных водоотливных средств, либо укрепить откос крупнозернистой пригрузкой.

Толщину пригрузки, необходимую для обеспечения устойчивости откоса заложением m, можно определять при помощи графика рис. 27 [Л. 32], на котором нанесена зависимость относительной толщины пригрузки $\bar{a}$ от $m\operatorname{tg}\varphi$ при различных m.

Пример расчета водопонизительной установки в сложных условиях. В качестве примера рассмотрим расчет водопонизительной установки котлована Саратовской ГЭС (один из проектных вариантов). Этот котлован прорезает аллювиальные пески со средним коэффициентом фильтрации k= =25 *м/сут* и врезается в алевриты. Кровля этих алевритов, являющихся водоупором для аллювиального горизонта, с южной части котлована практически

[1] Из-за криволинейности откоса расчетная величина m не совпадает со средним заложением откоса.

горизонтальная, несколько подымается в северо-западном направлении. Поверх аллювиальных песков находится покровный супесчаный слой средней мощностью $T=4$ *м* и коэффициентом фильтрации $k=1{,}0$ *м/сут* (рис. 28-*а*).

Расчет проводится на период прохождения паводка, когда перемычки оказываются под напором, причем горизонт воды перед перемычками устанавливается на отметке +30,0 *м*.

Разрез по линии I-I

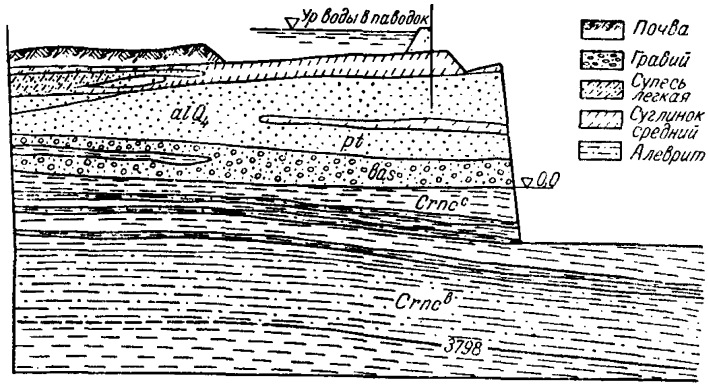


Рис. 28-*а*.

Проектируемая водопонизительная установка состоит из системы скважин располагаемых на расстоянии 40 *м* от контура котлована.

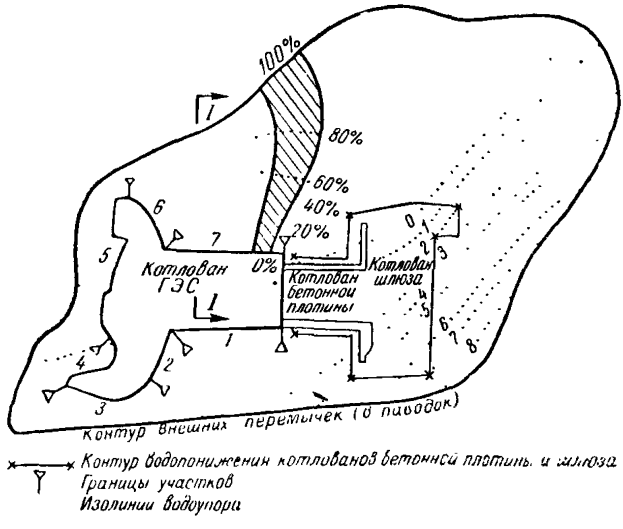


Рис. 28-*б*.

Весь контур котлована разбивается на восемь участков (рис. 28-*б*), из которых прямому расчету подвергаются семь участков. Приток участка 8 не рассматривается, так как здесь поток перехватывается водопонизительной установкой котлована бетонной плотины.

Наличие супесчаного покрова учитывается увеличением длины потока на величину ΔL, определяемую по формуле (I, 8а) при $k=25$ *м/сут*, $k_1=1{,}0$ *м/сут*, $T=23$ *м*, $T_1=4$ *м*

$$\Delta L = \sqrt{\frac{25}{1{,}0}\,23\cdot 4} = 50.$$

Дальнейший расчет притоков к отдельным участкам проведем в табличной форме, используя формулу (II, 14а).

Участок	1	2	3	4	5	6	7
$L_{ср}$, (*м*)	390	320	120	250	150	330	640
$L_{ср}+\Delta L$, (*м*)	440	370	170	300	200	380	690
Длина участка, (*м*)	520	230	430	250	830	300	550
h, (*м*)	28	28	28	29	30	30	30
Погонный приток, q, *м²/сут*	22	26	58	35	56	30	16
Общий приток к участку, Q, *м³/час*	480	250	1000	350	1940	370	370

Общий приток к котловану составляет 4760 *м³/час*. Если тот же приток посчитать без учета экранирующего влияния покровных супесей, то получится величина 6000 *м³/час*, т. е. по участку 3 приток увеличивается почти в 1,5 раза.

Проведем теперь для примера расчет водопонизительной установки по участку 3.

Расчет по участку 3. При погонном притоке порядка 60 *м²/сут* целесообразно применять в качестве насосного оборудования насос АТН-8 с паспортной производительностью 30 *м³/час* = 720 *м³/сут*. При этом расстояние между скважинами будет порядка 15 *м*. Скважины имеют диаметр 0,3 *м* и по условиям производства работ располагаются на расстоянии 40 *м* от подошвы откоса. Таким образом, имеем $L=170$ *м*, $l_1=130$ *м*, $l_2=40$ *м*, $d_c=0{,}3$ *м*, $h_c=0$, $h=28$ *м*.

Определяем ориентировочную величину σ по формуле (II, 23б)

$$\sigma = 2\,\frac{720}{25}\,\frac{130}{28^2} = 10\ м.$$

При $\frac{\sigma}{d_c}=33$ по номограмме рис. 67 находим $\Phi_к=0{,}38$. Тогда согласно (II, 23а)

$$\sigma = 2\,\frac{720}{25}\,\frac{130}{785-2\,\frac{170}{25}\,\frac{170}{40}\,0{,}38} = 2\cdot 28{,}8\,\frac{130}{185-93} = 10{,}8\ м.$$

Округляя, принимаем $\sigma = 11$ *м*.

По формуле (II, 24) находим погонный расход потока на откосе

$$q_0 = 25\,\frac{28^2}{5\cdot 170} - \frac{720}{11}\,\frac{130}{170} = 57{,}8 - 50{,}0 = 7{,}8\ м^2/сут.$$

Определим теперь размер оплывания откоса. При $q_0=7{,}8$ *м²/сут* (>7 *м²/сут*) величину χ определяем по табл. II-4, а λ по формуле (II, 30б) при $d_{50}=0{,}026$

$$\lambda = \sqrt{\frac{7{,}8}{0{,}026+0{,}05}} = 10{,}1 \text{ и } \chi = 0{,}31.$$

При $\operatorname{tg}\varphi = 0{,}6$ по формуле (II, 29) находим

$$I_c = 0{,}31 \cdot 0{,}3 = 0{,}093.$$

Расчетное заложение откоса определяем согласно (II, 31)

$$m = \frac{5}{0{,}6 + 3 \cdot 0{,}093} = 5{,}7.$$

По формуле (II, 25) при $m = 5{,}7$ находим высоту высачивания

$$h_в = (5{,}7 + 0{,}5)\,\frac{7{,}8}{25} = 1{,}9\ м,$$

а согласно (II, 28) определяем длину языка оплывания $l_{опл}$

$$l_{опл} = \frac{h_в}{I_c} = \frac{1{,}9}{0{,}093} = 20\ м.$$

По-видимому, такой размер оплывания, если и может быть допущен, то лишь в начальный период разработки котлована, а в дальнейшем его следует уменьшить. Для этого целесообразно вдоль откоса поставить дополнительно иглофильтровые установки и провести расчет для двухрядной системы скважин.

§ 11. Расчет водопонижения в двухслойной среде

При двухслойном сложении основания котлована (рис. 29) радикальное решение водопонижения может быть достигнуто прежде всего за счет работы водопонизительных скважин в основном водоносном горизонте. Установка же водопонизительных скважин

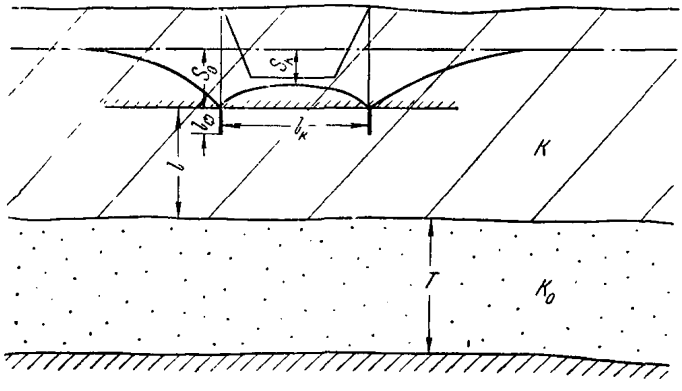


Рис. 29.

в верхнем покровном слое может оказаться целесообразной только при большой его мощности и малой ширине водопонизительной установки (котлована).

При выводе расчетных зависимостей, определяющих эффективность работы двух рядов водопонизительных скважин (иглофильтров) в верхнем слое [Л. 34], каждый ряд скважин заменя-

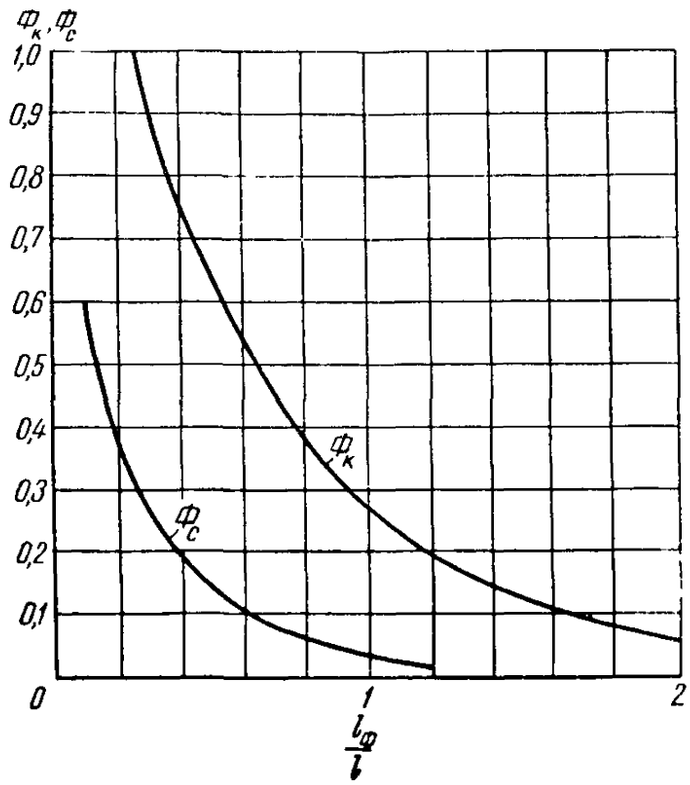


Рис. 30-*а*.

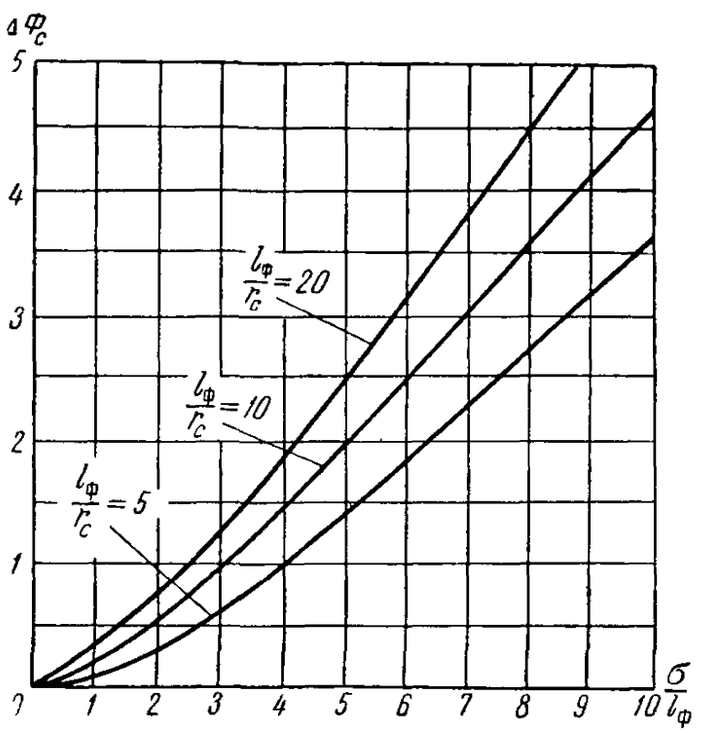


Рис. 30-б.

ется эквивалентной горизонтальной дреной радиуса $r_д$, определяемого из соотношения

$$\lg \frac{2\sigma}{r_д} = \frac{\sigma}{2l_ф} \lg \frac{4l_ф}{r_с}. \qquad \text{(II, 32)}$$

Используя далее решение А. В. Романова для двух скважин в полосе между двумя областями питания [Л. 26], получим следующие зависимости для определения приведенного погонного притока $\bar{q} = \frac{q}{k}$ к системе скважин (иглофильтров) и понижения уровня воды под дном котлована S_0 при заданном понижении уровня в скважинах $S_с$

$$\bar{q} = \frac{S_с}{0{,}73 \lg \frac{8l}{\pi l_ф} + \Phi_с + \Delta\Phi_с}, \qquad \text{(II, 33)}$$

$$S_0 = \bar{q}\Phi_к. \qquad \text{(II, 34)}$$

В приведенных зависимостях $\Phi_с$ и $\Delta\Phi_с$ — дополнительные фильтрационные сопротивления, определяемые взаимодействием рядов скважин и отдельных скважин между собой. (Значения $\Phi_с$, $\Delta\Phi_с$ и $\Phi_к$ могут быть определены по графикам рис. 30-*а* и *б*).

Для контурных установок в качестве величины $2l_к$ принимается ее минимальный размер (ширина).

Для определения понижения напора под котлованом в основном водоносном пласте установку следует привести к большому колодцу с общим расходом $Q = qP_к$, где $P_к$—периметр котлована, и подсчитать далее величину понижения $S_к$ в соответствии с зависимостью (II, 3). Общее понижение уровня определится при этом, как сумма понижений S_0 и $S_к$.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ВОДОПОНИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ ОТКАЧКИ

А. РАСЧЕТ ВОДОПОНИЗИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК В ТИПОВЫХ УСЛОВИЯХ

§ 12. Оценка общего и дополнительного притоков к водопонизительным установкам

В типовых условиях для определения общего притока грунтовых вод к водопонизительной установке в период первоначальной откачки можно пользоваться расчетами по способу большого колодца, радиус которого $r_к$ определяется в соответствии с указаниями § 6 (см. формулы (II, 1), (II, 1а), (II, 2), (II, 2а), (II, 2б)).

Расчет обычно выполняется для конечного момента времени первоначальной откачки ($t_к$), которое задается на основании общего календарного плана строительства и в течение которого уровни грунтовых вод должны быть снижены до проектных отметок в межень. Таким образом, исходными величинами для определения общего дебита установки в рассматриваемом случае являются, кроме фильтрационных характеристик грунта (см. приложение 3) и параметров, характеризующих геометрическую форму и размеры пласта и контура водопонизительной установки, общее время первоначальной откачки и проектное понижение уровня в межень в центре котлована M_0.

Общий приток к водопонизительной установке определяется по следующей единой формуле:

$$Q_0 = \frac{kTS}{f_{t_к}(M_0)}, \qquad \text{(III, 1)}$$

где S — проектное понижение в межень в центре котлована M_0, принимаемое в зависимости от геологического строения пласта в соответствии с рекомендациями § 3;

$f_{t_к}(M_0)$ — функция понижения в центре M_0 в конечный момент первоначальной откачки $t_к$.

Выражения функции $f_{t_к}(M_0)$ приводятся в табл. III-1 в зависимости от различных условий питания пласта.

Таблица III-1

Схема условий питания в плане	Расчетные формулы
Котлован в неограниченном пласте	$-\frac{1}{4\pi} Ei\left(-\frac{r_к^2}{4\beta t_к}\right)$ (а$_0$)
а) Котлован у прямолинейного контура питания (у реки) — рис. 18-*а* — [Л.28]	$-\frac{1}{4\pi}\left[Ei\left(-\frac{r_к^2}{4\beta t_к}\right) - Ei\left(-\frac{L^2}{\beta t_к}\right)\right]$ (а)
б) Котлован в углу между двумя прямолинейными контурами питания — рис. 18-*б*	$-\frac{1}{4\pi}\left[Ei\left(-\frac{r_к^2}{4\beta t_к}\right) - Ei\left(-\frac{L_1^2}{\beta t_к}\right) + Ei\left(-\frac{\sqrt{L_1^2 + L^2}}{\beta t_к}\right) - Ei\left(-\frac{L^2}{\beta t_к}\right)\right]$ (б)
в) Котлован в углу между прямолинейными контуром питания и непроницаемой границей — рис. 18-*в*	$-\frac{1}{4\pi}\left[Ei\left(-\frac{r_к^2}{4\beta t_к}\right) + Ei\left(-\frac{L_1^2}{\beta t_к}\right) - Ei\left(-\frac{\sqrt{L_1^2 + L^2}}{\beta t_к}\right) - Ei\left(-\frac{L^2}{\beta t_к}\right)\right]$ (в)
г) Котлован в полосовидном пласте, ограниченном прямолинейными контуром питания и непроницаемой границей — рис. 18-*г*	$-\frac{1}{4\pi}\left[Ei\left(-\frac{r_к^2}{4\beta t_к}\right) + Ei\left(-\frac{l_2^2}{\beta t_к}\right) - Ei\left(-\frac{l_1^2}{\beta t_к}\right)\right]$ (г)
д) Котлован в полосовидном пласте, ограниченном прямолинейными контурами питания или стока — рис. 18-*д*	$-\frac{1}{4\pi}\left[Ei\left(-\frac{r_к^2}{4\beta t_к}\right) - Ei\left(-\frac{l_1^2}{\beta t_к}\right) - Ei\left(-\frac{l_2^2}{\beta t_к}\right)\right]$ (д)
е) Котлован в круговом пласте, ограниченном контуром питания — рис. 18-*е*	$-\frac{1}{4\pi}\left[Ei\left(-\frac{r_к^2}{4\beta t_к}\right) - Ei\left(-\frac{L_р^2}{\beta t_к}\right)\right]$[1], где $L_р = \frac{R_к^2 - \delta^2}{R_к}$ (е)

[1] Решение для схемы „*е*“ предложено В. М. Шестаковым.

В табл. III-1 функция $Ei(-\alpha)$ называется интегральным экспоненциалом [Л. 36]. Значения этой функции приводятся в табл. III-2.

Таблица III-2

α	$Ei(-\alpha)$	α	$Ei(-\alpha)$	α	$Ei(-\alpha)$	α	$Ei(-\alpha)$	α	$Ei(-\alpha)$
0,00	—	0,28	—0,957	0,56	—0,493	0,84	—0,289	2,2	—0,037
0,01	—4,038	0,29	—0,931	0,57	—0,493	0,85	—0,284	2,3	—0,032
0,02	—3,355	0,30	—0,906	0,58	—0,473	0,86	—0,279	2,4	—0,028
0,03	—2,959	0,31	—0,882	0,59	—0,464	0,87	—0,272	2,5	—0,025
0,04	—2,681	0,32	—0,858	0,60	—0,454	0,88	—0,269	2,6	—0,022
0,05	—2,468	0,33	—0,836	0,61	—0,445	0,89	—0,265	2,7	—0,019
0,06	—2,295	0,34	—0,815	0,62	—0,437	0,90	—0,260	2,8	—0,017
0,07	—2,151	0,35	—0,794	0,63	—0,428	0,91	—0,256	2,9	—0,015
0,08	—2,027	0,36	—0,774	0,64	—0,420	0,92	—0,251	3,0	—0,013
0,09	—1,919	0,37	—0,755	0,65	—0,412	0,93	—0,247	3,1	—0,011
0,10	—1,823	0,38	—0,737	0,66	—0,404	0,94	—0,243	3,2	—0,010
0,11	—1,737	0,39	—0,719	0,67	—0,396	0,95	—0,239	3,3	—0,009
0,12	—1,660	0,40	—0,702	0,68	—0,388	0,96	—0,235	3,4	—0,008
0,13	—1,589	0,41	—0,686	0,69	—0,381	0,97	—0,231	3,5	—0,007
0,14	—1,524	0,42	—0,670	0,70	—0,374	0,98	—0,227	3,6	—0,006
0,15	—1,464	0,43	—0,655	0,71	—0,367	0,99	—0,223	3,7	—0,005
0,16	—1,409	0,44	—0,640	0,72	—0,360	1,00	—0,219	3,8	—0,005
0,17	—1,358	0,45	—0,625	0,73	—0,353	1,10	—0,186	3,9	—0,004
0,18	—1,310	0,46	—0,611	0,74	—0,347	1,20	—0,158	4,0	—0,004
0,19	—1,265	0,47	—0,598	0,75	—0,340	1,30	—0,136	4,1	—0,003
0,20	—1,223	0,48	—0,585	0,76	—0,334	1,40	—0,116	4,2	—0,003
0,21	—1,183	0,49	—0,572	0,77	—0,328	1,50	—0,100	4,3	—0,003
0,22	—1,145	0,50	—0,560	0,78	—0,322	1,60	—0,086	4,4	—0,002
0,23	—1,110	0,51	—0,548	0,79	—0,316	1,70	—0,075	4,5	—0,002
0,24	—1,076	0,52	—0,536	0,80	—0,311	1,80	—0,065	4,6	—0,002
0,25	—1,044	0,53	—0,525	0,81	—0,305	1,90	—0,056	4,7	—0,002
0,26	—1,014	0,54	—0,514	0,82	—0,300	2,00	—0,049	4,8	—0,001
0,27	—0,985	0,55	—0,503	0,83	—0,294	2,10	—0,043	4,9	—0,001
0,28	—0,957	0,56	—0,493	0,84	—0,289	2,20	—0,037	5,0	—0,001

Примечание. При малых значениях α

$$-Ei(-\alpha) = \ln\frac{1}{\alpha} - 0{,}574\,.$$

Параметр Буссинеска β (коэффициент уровнепроводности) здесь и ниже определяется так, как это указано в приложении 3.

Общий дополнительный приток ΔQ_0 к водопонизительной установке в период первоначальной откачки определяется по формуле

$$\Delta Q_0 = Q_0 - Q_м\,, \qquad \text{(III, 2)}$$

где Q_0 — находится по формуле (III, 1);

$Q_м$ — общий приток к установке для случая поддержания проектных уровней в межень (см. гл. II).

После определения дополнительного дебита ΔQ_0 ориентировочно находится требуемое для проведения первоначальной откачки в заданный срок дополнительное количество скважин установки.

Для проведения первоначальной откачки дополнительные скважины не требуются при $\Delta Q_0 < n_c (Q_{c.пр} - Q_{c.опт})$, где $Q_{c.опт}$ — дебит скважины, соответствующий оптимальной производительности насоса; $Q_{c.пр}$ — дебит скважины, соответствующий предельной производительности насоса; n_c — количество основных скважин, т. е. скважин, предусмотренных для периода поддержания проектных уровней в межень.

При $\Delta Q_0 > n_c (Q_{c.пр} - Q_{c.опт})$ количество дополнительных скважин n'_c определяется по формуле

$$n'_c = \frac{\Delta Q_0 - n_c (Q_{c.пр} - Q_{c.опт})}{Q_{c.пр}}. \qquad \text{(III, 3)}$$

Если необходимо жестко соблюдать график производства земляных работ по выемке котлована, то следует сделать поверочные расчеты для промежуточных моментов времени $t < t_к$. В этих случаях расчет выполняется также по формуле (III, 1) с помощью табл. III-1, в которых вместо $t_к$ следует иметь в виду рассматриваемый момент времени t.

При известном дебите Q_0, найденном, как это указано выше, по расчету для конечного момента $t_к$, определяется понижение, соответствующее моменту t. Если это понижение менее требуемого, то по формуле (III, 1) вновь определяется Q_0, исходя из требуемого понижения в момент времени t.

После определения ориентировочного количества дополнительных скважин и расстановки их в системе основных скважин, положение которых уже фиксировано и не подлежит изменению, для крупных водопонизительных установок выполняется детальный расчет с помощью более точных методов, излагаемых ниже.

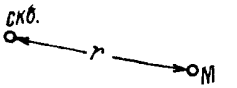
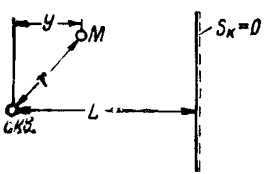
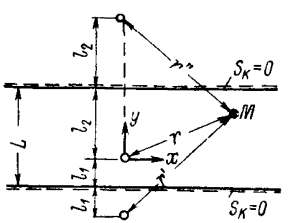
§ 13. Детальный расчет взаимодействующих скважин

а. Системы отдельно стоящих скважин

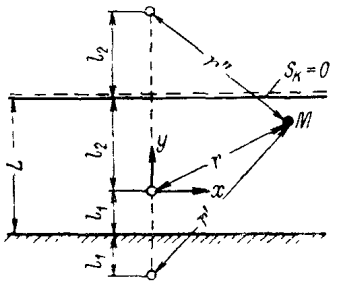
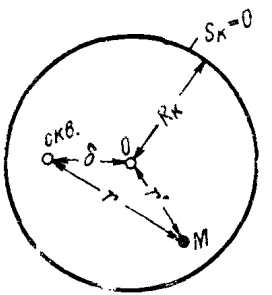
Как и при установившемся режиме фильтрации (см. § 7), расчет выполняется по формулам (II, 4) ÷ (II, 7а), в которых вместо функции понижения f_c при установившемся режиме следует иметь в виду функцию понижения f_{ct} при неустановившемся режиме фильтрации для момента времени $t \leqslant t_к$. Выражения для функции понижения f_{ct} от действия одной скважины приводятся в табл. III-3 в зависимости от различных условий питания пласта.

В табл. III-3 $f_{c.у}$ является функцией понижения для соответствующего установившегося режима фильтрации и определяется с помощью табл. II-2. Значения $Ei(-\alpha)$ определяются по табл. III-2, значения функций $F^*(\xi, \eta)$ — по графикам на рис. 31.

Таблица III-3

№ схемы	Наименование схемы расположения скважины	Изображение схемы	Выражение для функции понижения
1	В неограниченном пласте		[Л. 37] $f_c = -\frac{1}{4\pi} Ei\left(-\frac{r^2}{4\beta t}\right)$
2	В полуограниченном пласте с одним контуром питания (стока)		[Л. 28] $f_c = \frac{1}{4\pi}\left[Ei\left(-\frac{4L^2-4Ly+r^2}{4\beta t}\right) - Ei\left(-\frac{r^2}{4\beta t}\right)\right]$
3	В полосообразном пласте с двумя контурами питания (стока)		$f_c = \frac{1}{4\pi}\left\{Ei\left[-\frac{(r')^2}{4\beta t}\right] + Ei\left[-\frac{(r'')^2}{4\beta t}\right] - Ei\left[-\frac{r^2}{4\beta t}\right]\right\}$ при $\frac{L^2}{4\beta t} \geqslant 4$ $f_c = f_{c.y} - \sin\frac{\pi l_1}{L_1}\sin\frac{\pi(l_1-y)}{L} F^*\left(\frac{x}{l}, \frac{L^2}{\beta t}\right) -$ $-\frac{1}{2}\sin\frac{2\pi l_1}{L}\sin\frac{2\pi(l_1-y)}{L} F^*\left(\frac{2x}{L}, \frac{L^2}{4\beta t}\right)$ при $4 > \frac{L^2}{4\beta t} > 0{,}5$

Продолжение

№ схемы	Наименование схемы расположения скважины	Изображение схемы	Выражение для функции понижения
4	В полосообразном пласте с одним контуром питания (стока) и одним непроницаемым контуром		$f_c=\frac{1}{4\pi}\left\{Ei\left[-\frac{(r'')^2}{4\beta t}\right]-Ei\left[-\frac{(r')^2}{4\beta t}\right]-Ei\left[-\frac{r^2}{4\beta t}\right]\right\}$ при $\frac{L^2}{4\beta t}\geqslant 4$ $f_c=f_{c\,y}-2\sin\frac{\pi l_2}{2L}\sin\frac{\pi(l_2-y)}{2L}F^*\left(\frac{x}{2L},\ \frac{4L^2}{\beta t}\right)-$ $-\frac{2}{3}\sin\frac{3\pi l_2}{2L}\sin\frac{3\pi(l_2-y)}{2L}F^*\left(\frac{3x}{2L},\ \frac{4L^2}{9\beta t}\right)$ при $4>\frac{L^2}{4\beta t}>0{,}1$
5	В пласте с круговым контуром питания		$f_c=\frac{1}{4\pi}\left[Ei\left(-\frac{L_p^2}{4\beta t}\right)-Ei\left(-\frac{r^2}{4\beta t}\right)\right]$, где $L_p=\sqrt{R_к^2+\frac{(r')^2\delta^2}{R_к^2}-\delta^2+r^2(-(r')^2}$. В скважине $L_p=\frac{R_к^2-\delta^2}{R_к}$

Примечание. Решения для схем 3 и 4 получены С. Н. Нумеровым на основании работы [Л. 22] и публикуются здесь с его разрешения.

Для определения функций f_c в скважине следует полагать $r = r_c$, $r' = 2l_1$, $r'' = 2l_2$, $x = 0$ и $y = 0$[1].

После определения функций понижения f_{ct} для характерных расчетных точек, которые намечаются внутри котлована и в точках расположения скважин, находящихся в наиболее неблагоприятных условиях, при заданном общем количестве основных и дополнительных скважин и дебитов одной скважины определяются понижения уровня в расчетных точках. В случае значительных расхождений в расчетных и требуемых по проекту понижениях следует произвести перестановку дополнительных скважин, изменить их число или сделать и то и другое, после чего

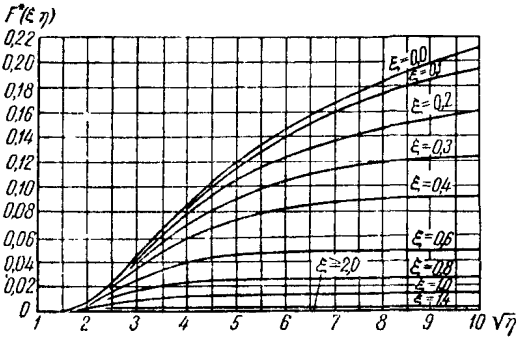


Рис. 31.

вновь выполнить расчет. После окончательного установления местоположения и количества дополнительных скважин уточняется общая величина дополнительного притока ΔQ_0 и притока Q_0 к водопонизительной установке в период первоначальной откачки по сравнению с величинами их, подсчитанными согласно § 12.

б. Расчет составного контура водопонизительной установки

При большом количестве скважин водопонизительной установки детальный расчет для периода первоначальной откачки рекомендуется выполнять по методике, изложенной для аналогичного случая при установившемся режиме фильтрации в § 7.

Основными расчетными формулами являются формулы (II, 9), (II, 11), в которых вместо функции понижения f от действия участка контура при установившемся режиме фильтрации следует иметь в виду функцию понижения f_t от действия участка контура при неустановившемся режиме фильтрации в расчетный момент времени $t \leqslant t_к$ (обычно достаточно полагать $t = t_к$). Под общим количеством скважин для каждого участка следует иметь

[1] Следует иметь в виду, что при малых значениях α $-Ei(-\alpha) = \ln\frac{1}{\alpha} - 0{,}574$.

в виду в этих формулах сумму основных и дополнительных скважин участка ($n_c + n_c'$).

Дополнительные скважины, ориентировочное общее количество которых для всей установки определяется согласно § 12, распределяются в первом приближении по участкам пропорционально количеству основных скважин для каждого из них. Такое размещение дополнительных скважин в системе основных скважин выполняется равномерно, насколько это возможно, вдоль каждого участка.

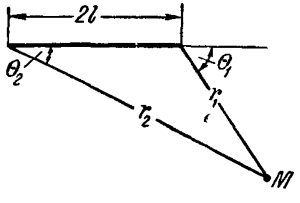


Рис. 32.

Если расчетные понижения в характерных точках значительно отличаются от требуемых по проекту, то следует сделать перестановку дополнительных скважин и вновь провести расчет. После окончательного определения местоположения и количества дополнительных скважин определяется общий приток Q_0 и общий дополнительный приток ΔQ_0.

Функция понижения f_t от действия одного участка контура водопонизительной установки, расположенной в неограниченном пласте, определяется [Л. 24, 25] по формуле

$$f_t = \frac{r_2}{2l} F(\alpha_2, \theta_2) - \frac{r_1}{2l} F(\alpha_1, \theta_1), \qquad \text{(III, 5)}$$

где r_1, r_2 — радиусы, соединяющие точку M, в которой определяется понижение, с концами участка длиной $2l$, причем $r_2 > r_1$;

θ_1, θ_2 — углы, образованные направлением участка соответственно с направлениями радиусов r_1 и r_2, причем углы отсчитываются от участка к радиусам по часовой стрелке;

$$\alpha_1 = \frac{r_1}{2\sqrt{\beta t}}, \quad \alpha_2 = \frac{r_2}{2\sqrt{\beta t}} \text{ (рис. 32);}$$

$F(\alpha, \theta)$ — функция, значение которой находится по графику рис. 33-*а*, *б*.

При $\theta > \frac{\pi}{2}$ $F(\alpha, \theta) = -F(\alpha, \pi - \theta)$. При $\theta = \frac{\pi}{2}$ или $\alpha = \infty$, что соответствует $t = 0$, $F(\alpha, \theta) = 0$. При $\alpha = 0$, т. е. при $r = 0$ или $t = \infty$, причем последнее соответствует установившемуся режиму фильтрации,

$$F(\alpha, \theta) = A - B \ln \alpha, \qquad \text{(III, 6)}$$

где $B = \frac{1}{2\pi} \cos\theta$ и значения A находятся по графику на рис. 33-*а*. Практически формулой (III, 6) можно пользоваться при $\alpha \leqslant 0{,}2$.

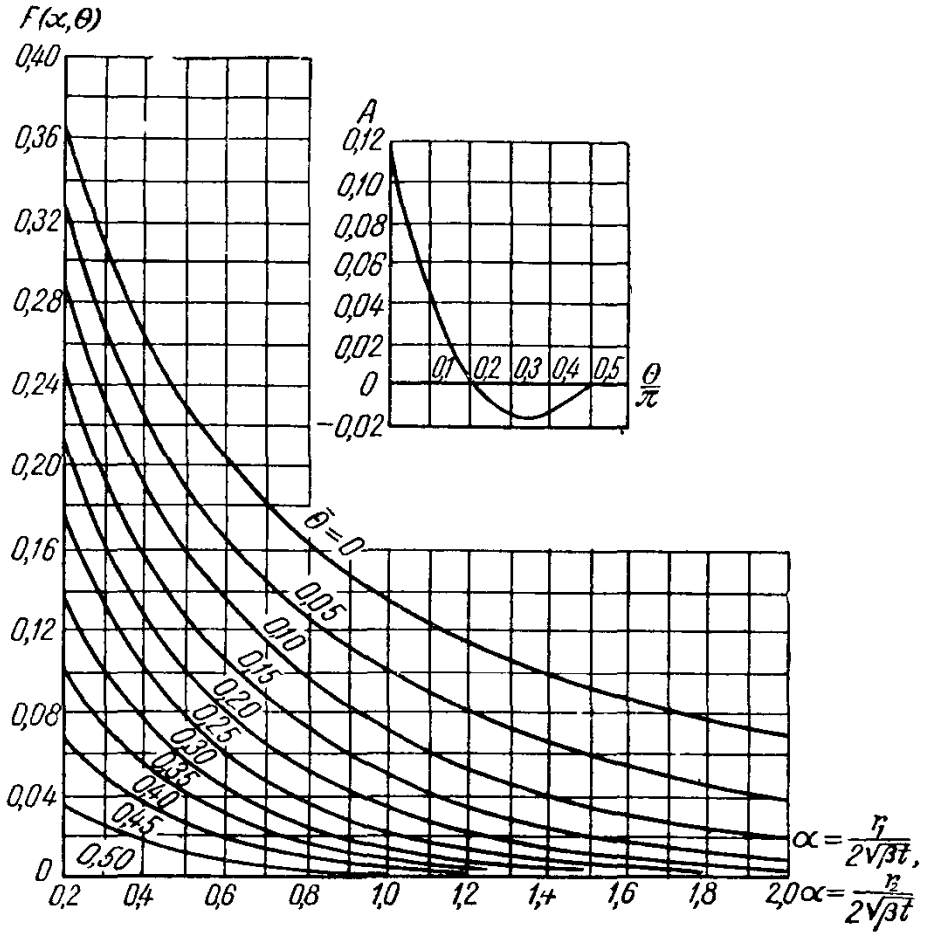


Рис. 33-*а*.

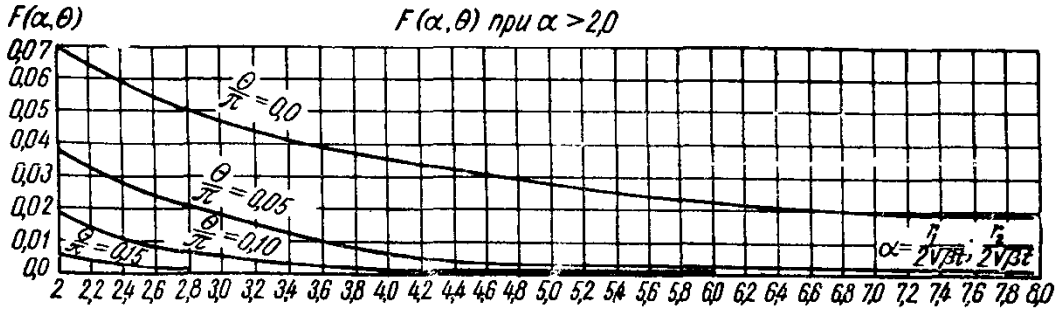


Рис. 33-*б*.

Функция понижения f_t от действия одного участка контура водопонизительной установки, расположенной в полуограниченном пласте с прямолинейным контуром питания (рис. 34), определяется по формуле

$$f_t = f_{дt} - f_{фt}, \qquad \text{(III,7)}$$

где $f_{дt}$ — функция понижения от действия действительного участка скважин, определяемая по формуле (III, 5);

$f_{фt}$ — функция понижения от действия фиктивного участка скважин, являющегося зеркальным отображением действительного участка (рис. 34), причем

$$f_{фt} = \frac{r_2'}{2l} F(\alpha_2', \theta_2') - \frac{r_1'}{2l} F(\alpha_1', \theta_1'). \qquad \text{(III, 8)}$$

Во всех других случаях типовых условий питания пласта функцию понижения f_t рекомендуется определять по формуле (II, 12) [Л.31]. В этой формуле f_c следует заменить f_{ct}, опреде-

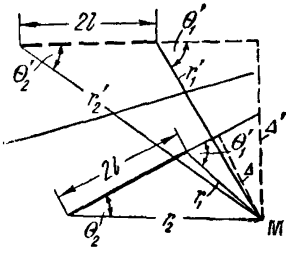


Рис. 34.

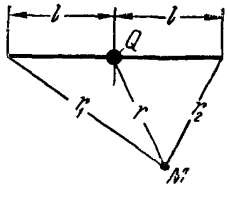


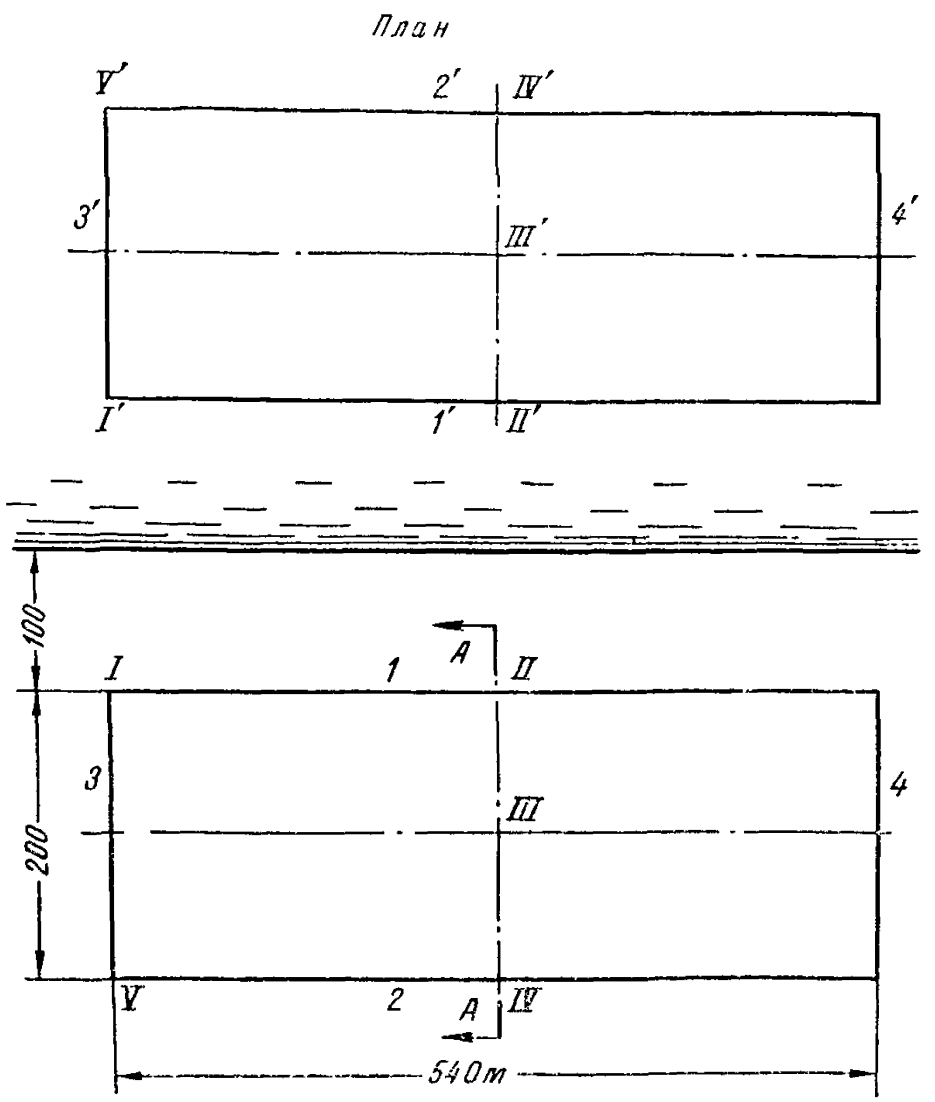
Рис. 35.

ляемой по табл. III-3, и отсчитывать все расстояния от середины участка. Вместо Δf следует принимать Δf_t, которая находится по формуле

$$\Delta f_t = -\frac{1}{4\pi} Ei\left(-\frac{r^2}{4\beta t}\right) + \frac{r_1}{2l} F(\alpha_1, \theta_1) - \frac{r_2}{2l} F(\alpha_2, \theta_2), \qquad \text{(III, 9)}$$

где r — расстояние от середины участка до точки, в которой определяется понижение. Все другие обозначения ясны из рис. 35. Функция $Ei(\alpha)$ и $F(\alpha, \theta)$ определяются, как и ранее, с помощью табл. III-2 и графика рис. 33-*а, б*.

Пример расчета. Требуется выполнить фильтрационный расчет при неустановившемся режиме фильтрации в период первоначальной откачки водопонизительной установки для прямоугольного котлована, расположенного в полуограниченном пласте с прямолинейным контуром питания (береговой котлован). Схема водопонизительной установки в плане и в разрезе приводится на рис. 36.



Разрез по А-А

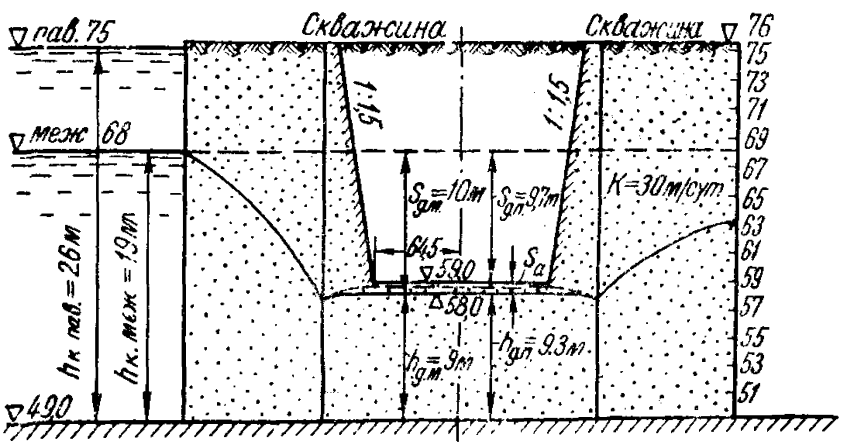


Рис. 36.

Водоносный пласт — безнапорный и состоит из однородных по водонепроницаемости грунтов с коэффициентом фильтрации $k = 30$ *м/сут* и коэффициентом водоотдачи $\mu = 0{,}20$. Бытовой поток отсутствует. Глубина грунтовых вод на контуре питания $h_{к.м} = 19$ *м*.

На территории котлована задана постоянная норма осушения, составляющая для периода поддержания проектных уровней в межень 1 *м* от отметки дна котлована. Этой норме осушения соответствует допустимое понижение на территории котлована $S_{д.м} = 10$ *м* и допустимые глубины грунтовых вод $h_{д.м} = 9$ *м*.

Котлован разрабатывается насухо. Срок первоначальной откачки принимается равным $t_к = 100$ *сут*.

Поскольку котлован разрабатывается насухо и расположен в пласте с простыми условиями питания, расчет выполняем по методу сложения течений для линий равного притока.

Сначала оценим общий приток Q_0 по формуле (III, 1) и с помощью табл. III-1.

По формуле (II, 2б) $r_к = 1{,}15\dfrac{200 + 540}{4} = 212$ *м*; по формуле (II, 20), приведенной в приложении 3, $\beta = \dfrac{30 \cdot 14}{0{,}2} = 2100$ *м³/сут*, где $h_{ср} = \dfrac{19 + 9}{2} = 14$ *м*;

$$\frac{L^2}{\beta t_к} = \frac{200^2}{2100 \cdot 100} = 0{,}190; \quad \frac{r^2_к}{4\beta t_к} = \frac{212^2}{4 \cdot 2100 \cdot 100} = 0{,}054$$

и тогда по табл. III-2 находим

$$Ei(-0{,}190) = -1{,}265; \quad Ei(-0{,}054) = -2{,}399.$$

Заменяя в (III, 1) S по формуле (I, 3), находим

$$Q_0 = \frac{\dfrac{30}{2}(19^2 - 9^2)}{\dfrac{1}{4 \cdot 3{,}14}(2{,}399 - 1{,}265)} = 46500 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Для периода поддержания проектных уровней в межень по формуле (II, 3)

$$Q_м = \frac{\dfrac{30}{2}(19^2 - 9^2)}{0{,}367 \lg \dfrac{2 \cdot 200}{212}} = 41400 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Рассмотрим вариант оборудования скважин насосами АТН-8-1-7, для которых $Q_{с.опт} = 720$ *м³/сут*, $Q_{с.пр} = 1008$ *м³/сут*. Количество основных скважин ориентировочно составляет $n_с = \dfrac{41400}{720} = 58$ шт. Тогда $n_с (Q_{с.пр} - Q_{с.опт}) = 58 (1008 - 720) = 16700$ *м³/сут*. По (III, 2) $\Delta Q_0 = 46500 - 41400 = 3220$ *м³/сут*, т. е. $n_с (Q_{с.пр} - Q_{с.опт}) > \Delta Q_0$, и, следовательно, дополнительные скважины для проведения первоначальной откачки не требуются.

Для проверки понижений уровней в скважинах уточняем расчет по методике, изложенной в § 13, п. *б*. Контур водопонизительной установки заменяем четырьмя линиями равного притока 1 ÷ 4 и намечаем расчетные точки *I* ÷ *V* (рис. 36).

Результаты расчетов при установившемся режиме фильтрации для периода поддержания проектных уровней в межень, выполненных по методике, изложенной в § 7, п. *б*, и необходимых для первоначальной откачки, приводятся в табл. III-4.

Таблица III-4

№ линии	q, $м^2/сут$	$2l$, $м$	Q, $м^3/сут$	n_c, шт.	$\sigma = \frac{2l}{n_c}$
1	42,0	540	22800	32	16,3
2	7,0	540	3780	5	108
3	42,0	200	8400	12	16,7
4	42,0	200	8400	12	16,7
		Всего	43380	61	—

Примечание. Скважины совершенные и имеют диаметр $d_c = 0{,}25$ *м*.

Для расчетов в период первоначальной откачки используем формулы (II, 9а), (II, 11а), (II, 5а), принимая $q_1 = q_3 = q_4 = q$ и $\frac{q_2}{q} = 0{,}17$[1]. Значения f_t определяем при $t = t_к = 100$ *сут* по формулам (III, 5), (III, 7), (III, 8) с помощью графика на рис. 33-*а*, *б*.

Для каждой расчетной точки находим значения r_1, и r_2, r_1' и r_2', Δ и Δ' (рис 34), измеряя линейкой расстояния от точки до концов каждой линии равного притока и ее зеркального изображения, а также длину перпендикуляра (Δ и Δ'), опущенного из точки на каждую линию и ее зеркальное изображение. Найденные параметры записываем в таблицу, образцом которой служит, например, приведенная ниже таблица для точки I.

Таблица III-5

№ точки	№ линии	r_1 (r'_1), $м$	r_2 (r'_2), $м$	Δ, (Δ'), $м$	$\sin\theta_1 = \frac{\Delta}{r_1}$, $\sin\theta_2 = \frac{\Delta}{r_2}$	$\sin\theta_2 = \frac{\Delta}{r_2}$, $\sin\theta_2' = \frac{\Delta'}{r_2}$	θ_1, (θ_1')	θ_2, (θ_2')	$\frac{\theta_1}{\pi}$, $\left(\frac{\theta_1'}{\pi}\right)$	$\frac{\theta_2}{\pi}$, $\left(\frac{\theta_2'}{\pi}\right)$
I	1	0	540	0	0	0	0	0	0	0
	1′	200	576	200	1	0,348	90°	20°20′	0,500	0,113
	2	200	576	200	1	0,348	90°	20°20′	0,500	0,113
	2′	400	672	400	1	0,595	90°	36°30′	0,500	0,203
	3	0	200	0	0	0	0	0	0	0
	3′	200	400	0	0	0	0	0	0	0
	4	540	576	540	1	0,938	90°	69°40′	0,500	0,387
	4′	576	672	540	0,938	0,804	69°40′	53°30′	0,387	0,298

Примечание. Аналогичный расчет выполняется для точек *II* – *V*.

Вычисления для определения $\bar{f}_{0t}$ во всех точках при $t_к = 100$ *сут* и $\beta = 2100$ $м^2/сут$ выполняем в табличной форме, образцом которой служит, например, таблица вычисления $\bar{f}_{0t}$ в точке I (см. табл. III-6). В этой же

[1] Отношение $\frac{q_2}{q} = 0{,}17$ найдено из условия равенства понижений в точках II и IV ($S_{II} = S_{IV}$) при установившемся режиме.

таблице приводятся значения $\overline{f_{0t}}$ в точках II ÷ V и соответствующие им значения $\overline{f_0}$ при установившемся режиме фильтрации.

Принимаем понижение уровня в точке I при $t = t_к$, равным допустимому, т. е. $S(I, t_к) = 10$ *м*. Тогда, имея в виду (I, 3), по формуле (II, 9а) находим

$$q = \frac{\frac{30}{2}(19^2 - 9^2)}{2 \cdot 93{,}6} = 44{,}8 \text{ м}^2/\text{сут};$$

$$q_1 = q_3 = q_4 = q = 44{,}8 \text{ м}^2/\text{сут};$$

$$q_2 = 0{,}165 \cdot 44{,}8 = 7{,}4 \text{ м}^2/\text{сут};$$

$$\Delta Q_0 = 46100 - 43280 = 2820 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Таким образом, при уточнении расчета имеем, как и по способу большого колодца, $n_с(Q_{с.пр} - Q_{с.опт}) = 61(1008 - 720) = 17600$ *м*³/*сут* > $\Delta Q_0 = 2820$ *м*³/*сут*, и, следовательно, дополнительные скважины не требуются.

Далее проверяем глубины воды в скважинах при $t = t_к = 100$ *сут*, учитывая, что в период первоначальной откачки $Q_с = \frac{Q_0}{n_с} = \frac{46100}{61} = 760$ *м*³/*сут*. Пользуемся формулой (II, 11а), в которой заменяем $S_с$ по (I, 3). Расчеты выполняем в табличной форме (см. табл. III-7).

Б. РАСЧЕТ ВОДОПОНИЗИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

§ 14. Общие положения методики расчета водопонизительных установок в сложных условиях питания

Расчет водопонизительных установок в сложных условиях питания в период первоначальной откачки, характеризуемой неустановившимся режимом фильтрации, выполняется, как и при установившемся режиме фильтрации, по характерным лентам тока сетки движения, соответствующей установившемуся режиму фильтрации (см. § 9).

В условиях неустановившегося режима фильтрации указанный приближенный метод расчета основан на допущении о недеформируемости линий тока. Предполагается, что линии тока при неустановившемся режиме фильтрации в любой момент времени приближенно совпадают по форме с линиями тока при соответствующем установившемся режиме фильтрации. Тогда приведенная длина $L_л$ и ширина $b_л$ каждой ленты тока при неустановившемся режиме фильтрации могут считаться постоянными и равными длине и ширине соответствующей ленты тока при установившемся режиме фильтрации.

Таким образом, основой для расчета водопонизительной установки в период первоначальной откачки является сетка движения, уже построенная для расчетов в условиях установившегося режима фильтрации в период поддержания проектных уровней в межень, причем в эту сетку вносятся небольшие дополнения (см. § 15, 16).

Таблица III-6

№ точки	№ линии	r_1 или r_1', м	r_2 или r_2', м	$\frac{\theta_1}{\pi}$, $\frac{\theta'_1}{\pi}$	$\frac{\theta_2}{\pi}$, $\frac{\theta'_2}{\pi}$	$\alpha_1 = \frac{r_1}{2\sqrt{\beta t}}$, $\alpha_1' = \frac{r'_1}{2\sqrt{\beta t}}$	$\alpha_2 = \frac{r_2}{2\sqrt{\beta t_к}}$, $\alpha'_2 = \frac{r_2'}{2\sqrt{\beta t_к}}$	$F(\alpha_1, \theta_1)$, $F(\alpha'_1, \theta_1')$	$F(\alpha_2, \theta_2)$, $F(\alpha'_2, \theta'_2)$	(3)×(9), м	(4)×(10), м	по ф-лам (III, 5) и (III,8) $2lf_{tд}$ или $2lf_{tф}$ (12) ± (11), м	$2lf_t = 2l(f_{tд} - f_{tф})$, м	по (II, 96), $\overline{f}_{0t}$, м	$\overline{f}_0$, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
I	1	0	540	0	0	0	0,586	∞	0,206	0	111,5	111,5	42,4	93,6	100,0
	1′	200	576	0,500	0,113	0,218	0,626	0	0,120	0	69,1	69,1			
	2	200	576	0,500	0,113	0,218	0,626	0	0,120	0	69,1	69,1	27,3		
	2′	400	672	0,500	0,203	0,516	0,732	0	0,062	0	41,8	41,8			
	3	0	200	0	0	0	0,218	∞	0,358	0	71,6	71,6	43,2		
	3′	200	400	0	0	0,218	0,435	0,358	0,250	71,6	100,0	28,4			
	4	540	576	0,500	0,387	0,586	0,626	0	0,021	0	12,1	12,1	4,1		
	4′	576	672	0,387	0,298	0,626	0,732	0,021	0,030	12,1	20,1	8,0			
II														98,0	110
III														98,9	110
IV														95,8	110
V														101,0	111

Примечание. Цифры, поставленные в скобках, обозначают выражения в соответствующих графах.

Таблица III-7

Расчетное q системы, $м^2/сут$	№ точки	$\overline{f}_{0t_к}$ (см. табл. III-6), $м$	$q\overline{f}_{0t_к}$ (1)×(3), $м^3/сут$	$\frac{2}{k}q\overline{f}_{0t_к}$, $м^2$	$\sigma_р$ по (П, 3), $м$	$\frac{\sigma_р}{d_с}$	$\Phi_к$ по рис. 67, ф-ла (П, 2)	$\frac{2}{k}Q_с\Phi_к$, $м^2$	h_0, $м$	h_0^2, $м^2$	$h_с^2 = (11) - (5) + (9)$, $м^2$	$h_с$, $м$	$S_с = h_0 - h_с$, $м$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
44,8	I	93,6	4200	280	16,8	56,0	0,458	23,2	19	361	57,8	7,6	11,4
	II	98,0	4410	294	16,9	56,5	0,459	23,3	19	361	43,7	6,6	12,4
	IV	95,8	4320	288	108,0	360,0	0,752	38,2	19	361	34,8	5,9	13,1
	V	101,1	4540	303	62,3	280,0	0,665	33,8	19	361	24,2	4,9	14,1

Примечание. Цифры, поставленные в скобках, обозначают математические выражения в соответствующих графах.

Расчет лент тока выполняется по одной из схем для бесконечных прямолинейных рядов равнодебитных скважин, эксплуатируемых во времени с постоянным дебитом, при неустановившемся режиме фильтрации.

§ 15. Расчет водопонизительных установок для котлованов, разрабатываемых насухо

При построении сетки движения для расчетов в период поддержания проектных уровней в межень в качестве контура стока принимается контур водопонизительной установки, если котлован несовершенный, и контур откосов котлована в плане, если котлован совершенный. При использовании этой сетки для расчетов первоначальной откачки следует иметь в виду, что при разработке котлованов насухо необходимо учитывать в период первоначальной откачки осушение грунта как во внешней по отношению к контуру водопонизительной установки зоне, так и во всей внутренней зоне. Поэтому для расчетов первоначальной откачки характерные ленты тока внешней зоны соединяются друг с другом попарно через внутреннюю зону так, как это показано, например, на рис. 37.

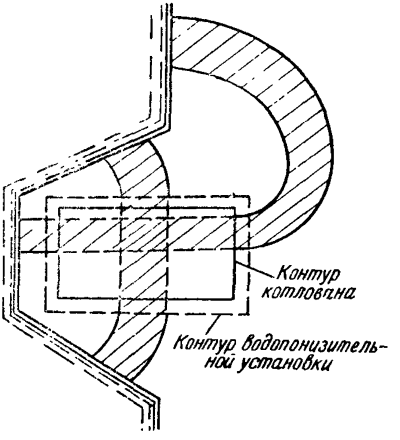


Рис. 37.

После того, как намечены несколько характерных лент тока, для них выбирается расчетная схема и выполняются сначала приближенные, а затем для крупных водопонизительных установок более точные расчеты.

а. Оценка общего и дополнительного притоков к водопонизительным установкам

Наиболее характерной расчетной схемой, к которой в рассматриваемом случае приводятся ленты тока, является схема на рис. 38.

В тех случаях, когда на территории котлована в пределах рассматриваемой ленты задается одинаковое понижение уровней грунтовых вод, т. е. можно полагать $S_1 = S_2 = S$ (рис. 38-*б*), где обозначения S_1, S_2 ясны из рис. 38-*в*, схема на рис. 38-*а* упрощается. В этом случае может быть использована схема ряда скважин в полосовидном пласте с прямолинейными конту-

ром питания и непроницаемой границей (рис. 39), причем под последней имеется в виду плоскость симметрии внутренней зоны (рис. 38-*б*).

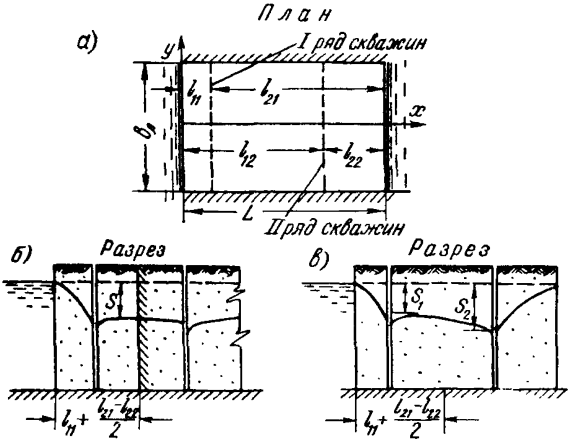


Рис. 38.

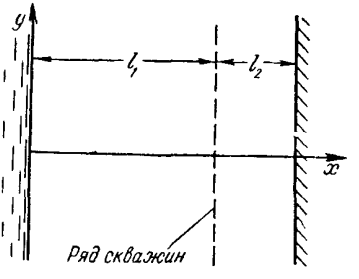


Рис. 39.

Для оценки общего и дополнительного притоков выбирается наиболее характерная лента тока, приводимая к схеме на рис. 39. Общий приток к каждому ряду скважин в пределах ленты определяется по формуле

$$Q_{0л} = \frac{kTSb_л}{f_{t_к}(M_0)}. \qquad \text{(III, 10)}$$

Здесь S — понижение уровня грунтовых вод в котловане в пределах рассматриваемой ленты, принимаемое равным понижению в период поддержания проектных уровней в межень;

$b_л$ — длина контура водопонизительной установки в пределах рассматриваемой ленты тока;

$S_{t_к}(M_0)$ — для схемы на рис. 39 определяется по формуле [Л. 22]

$$f_{t_к}(M_0) = l_1 - (l_1 + l_2)\left[F_4\left(\frac{l_2}{l_1 + l_2}, \frac{l_1 + l_2}{2\sqrt{\beta t_к}}\right) - F_4\left(\frac{2l_1 + l_2}{l_1 + l_2}, \frac{l_1 + l_2}{2\sqrt{\beta t_к}}\right)\right], \quad \text{(III, 11)}$$

где l_1 — принимается равной приведенной длине ленты тока во внешней зоне;

l_2 — половина расстояния между рядами скважин во внутренней зоне;

$F_4(\lambda, \alpha)$ — функция, определяемая по графику на рис. 40.

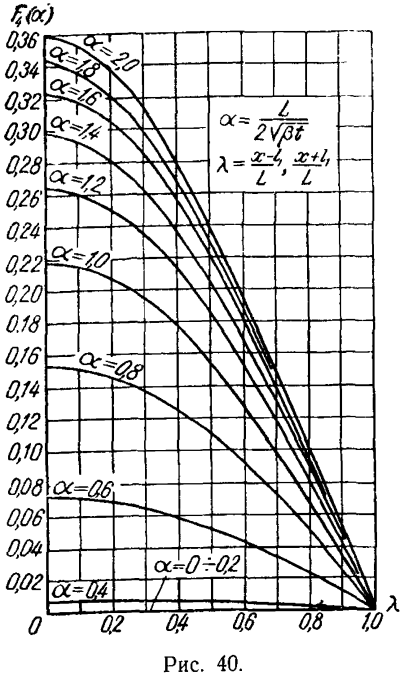


Рис. 40.

Дополнительный дебит $\Delta Q_{0л}$ и дополнительное количество скважин $n'_{л.с}$ рассматриваемой ленты определяется по формулам (III, 2) и (III, 3), в которых вместо общих дебитов и основного количества скважин всей установки следует иметь в виду дебиты $Q_{0л}$, $\Delta Q_{0л}$ и количество основных скважин $n_{л.с}$ рассматриваемой ленты. При $Q_с = Q_{с.пр}$ и $\Delta Q_{0л} > n_{л.с}(Q_{с.пр} - Q_{с.опт})$ количество дополнительных скважин определяется по формуле (III, 3).

Величины общего дебита Q_0, общего дополнительного дебита ΔQ_0 и общего количества дополнительных скважин всей

водопонизительной установки n_c' определяются умножением соответствующих величин рассмотренной ленты на отношение $\frac{n_c}{n_{л.с}}$, где n_c — общее основное количество скважин всей установки. Дополнительные скважины размещаются по контуру водопонизительной установки пропорционально основным скважинам, местоположение которых остается неизменным.

б. Уточнение расчетов

После расстановки дополнительных скважин делается проверка понижений в самих скважинах для нескольких лент тока, причем достаточно взять по одной скважине для каждого участка.

Понижение в скважине определяется по формуле

$$S_c = \frac{Q_c}{\sigma}\left\{ l_1 - (l_1 + l_2)\left[F_4\left(0, \frac{l_1 + l_2}{2\sqrt{\beta t_к}}\right) - F_4\left(\frac{2l_1}{l_1 + l_2}, \frac{l_1 + l_2}{2\sqrt{\beta t_к}}\right)\right]\right\} + \frac{Q_c}{kT}\Phi_к, \qquad \text{(III, 12)}$$

где σ — расчетный шаг скважины (см. приложение 1);

$\Phi_к$ — внутреннее фильтрационное сопротивление (см. приложение 1 и § 4);

$F_4(\lambda, \alpha)$ — функция, определяемая по графику на рис. 40.

§ 16. Расчет водопонизительных установок несовершенных котлованов, разрабатываемых способом гидромеханизации

Если котлован несовершенный, то при построении сетки движения для расчетов в период поддержания проектных уровней

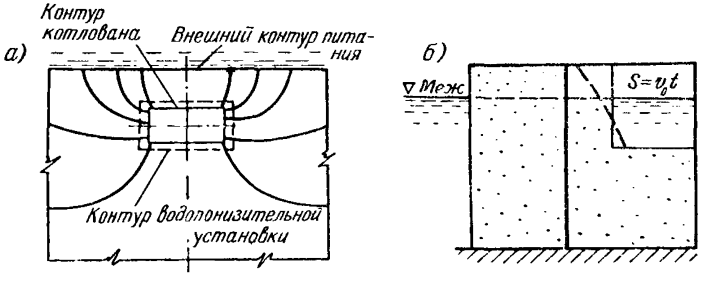


Рис. 41.

в межень в качестве контура стока принимается контур водопонизительной установки. При использовании этой сетки для расчетов первоначальной откачки следует графически продолжить

линии тока до контура откосов котлована в плане (см. рис. 41-*а*), причем откосы котлована заменяются вертикальными откосами так, как это показано на рис. 41-*б*.

Далее намечается несколько характерных лент тока и выполняются сначала приближенные, а затем более точные расчеты.

а. Оценка общего и дополнительного притоков к водопонизительным установкам

Расчетная схема, к которой приводятся ленты тока в рассматриваемом случае, представлена на рис. 42.

Дадим некоторые пояснения относительно указанной схемы.

На внешнем контуре питания пласта понижение уровней в межень равно нулю. На границе, соответствующей очертанию откосов котлована в плане, задается понижение уровней во времени по линейному закону ($S = v_0 t$), так как уровни открытых вод в котловане после его разработки обычно снижаются равномерно. Скорость понижения открытых вод v_0 определяется по заданным общему времени проведения первоначальной откачки $t_к$ и среднему проектному понижению S начальных уровней в межень на территории размещения котлована $\left(v_0 = \frac{S}{t_к}\right)$.

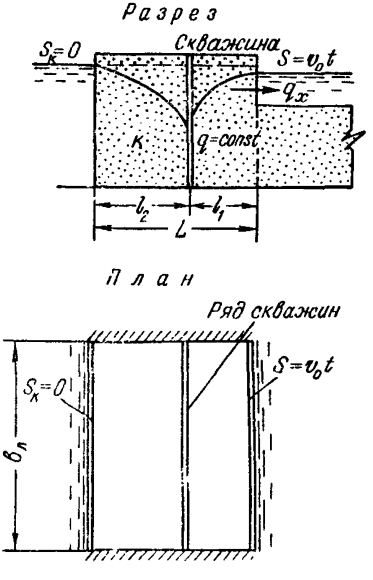


Рис. 42.

Расчет выполняется исходя из условий проведения первоначальной откачки в заданный срок $t_к$ и обеспечения устойчивости откосов котлована. Устойчивость откосов котлована зависит от величины удельного дебита фильтрационных вод на откосе котлована при опускании уровня открытых вод с заданной скоростью v_0 и эксплуатации скважин, расположенных вдоль откоса, с заданным по величине и постоянным во времени дебитом, причем определению подлежит требуемое количество скважин в период первоначальной откачки.

Последнее выполняется исходя из условия, что на откосы котлована не происходит выхода фильтрационных вод. При этом устойчивость откосов обеспечивается без каких-либо дополнительных мероприятий для их укрепления.

Для ориентировочного расчета выбирается наиболее характерная лента тока и определяется общий приток к участку контура установки в пределах ленты

$$Q_{0л} = \frac{kTv_0t_кb_л}{LF_3\left(\frac{l_1}{L}, \frac{L}{2\sqrt{\beta t_к}}\right)} F_{10}\left(\frac{L}{2\sqrt{\beta t_к}}\right). \qquad \text{(III, 13)}^1$$

Здесь $F_3(\lambda, \alpha)$, $F_{10}(\alpha)$ — функции, значения которых определяются по графикам на рис. 43, 44.

Дополнительный дебит $\Delta Q_{0л}$ и дополнительное количество скважин $n'_{л.с}$ для рассматриваемой ленты определяются по формулам (III, 2) ÷ (III, 3) так же, как это указано в § 15, п. *а*. Согласно § 15, п. *а* определяются также ориентировочные величины общего дебита Q_0, общего дополнительного дебита ΔQ_0 и общего количества дополнительных скважин $n_с'$ всей водопонизительной установки.

б. Уточнение расчетов

Для крупных водопонизительных установок расчет выполняется для всех лент тока, которые рассчитывались при установившемся режиме фильтрации, причем используется формула (III, 13).

После расстановки дополнительных скважин делается проверка понижений в самих скважинах.

Понижение в скважине, расположенной в пределах любой рассматриваемой ленты тока, определяется по формуле

$$S_с = \frac{Q_с}{kT\sigma}\left\{\frac{l_1l_2}{L} - L\left[F_2\left(0, \frac{L}{2\sqrt{\beta t_к}}\right) - F_2\left(\frac{2l_1}{L}, \frac{L}{2\sqrt{\beta t_к}}\right)\right]\right\} + v_0t_кF_9\left(\frac{l_1}{L}, \frac{L}{2\sqrt{\beta t_к}}\right) + \frac{Q_с}{kT}\Phi_к, \qquad \text{(III, 14)}$$

где $F_2(\lambda, \alpha)$, $F_9(\lambda, \alpha)$ — функции, значения которых определяются по графикам на рис. 45, 46;

$\Phi_к$, σ — внутреннее сопротивление и расчетный шаг скважины (см. приложение 1 и § 4).

Пример расчета. Требуется выполнить фильтрационный расчет водопонизительной установки для периода первоначальной откачки. Прямоугольный котлован расположен в полуограниченном пласте с прямолинейным контуром питания. Схема водопонизительной установки в плане и в разрезе при-

[1] Ф-ла (III, 13) получена по методу сложения течений на основании [Л. 10, 22].

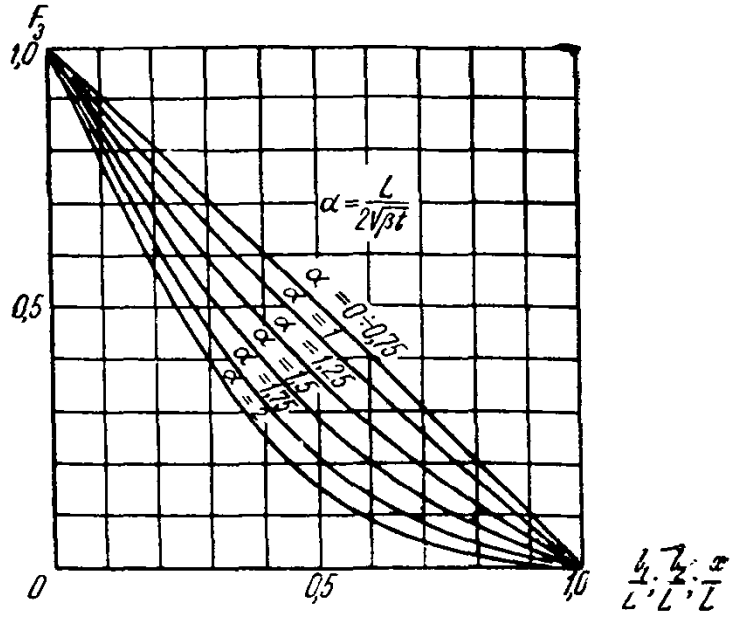

F_3
1,0
0,5
0
0,5
1,0
$\alpha = \frac{L}{2\sqrt{\beta t}}$
$\alpha = 0 \div 0{,}75$
$\alpha = 1$
$\alpha = 1{,}25$
$\alpha = 1{,}5$
$\alpha = 1{,}75$
$\alpha = 2$
$\frac{4}{L}; \frac{z}{L}; \frac{x}{L}$

Рис. 43.

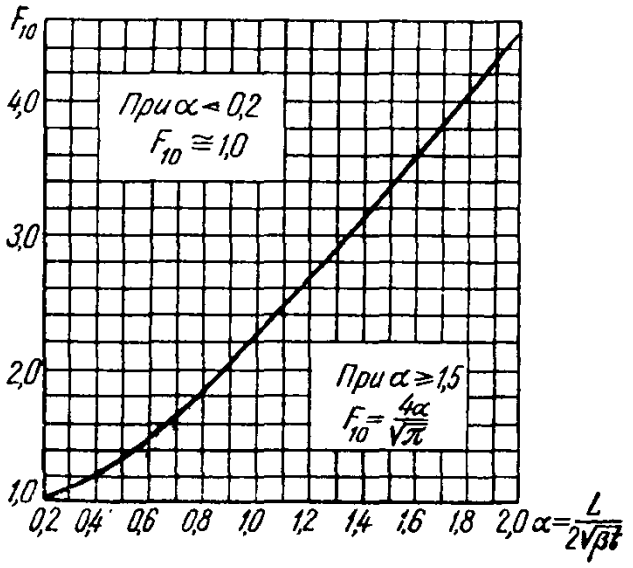

F_{10}
4,0
3,0
2,0
1,0
При $\alpha < 0{,}2$
$F_{10} \cong 1{,}0$
При $\alpha \geq 1{,}5$
$F_{10} = \frac{4\alpha}{\sqrt{\pi}}$
0,2 0,4 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0
$\alpha = \frac{L}{2\sqrt{\beta t}}$

Рис. 44.

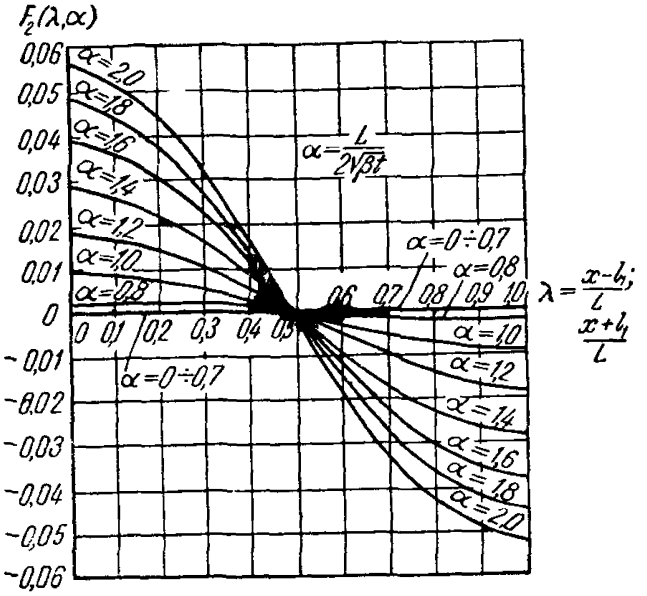

$F_2(\lambda,\alpha)$
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
-0,01
-0,02
-0,03
-0,04
-0,05
-0,06
α=2,0
α=1,8
α=1,6
α=1,4
α=1,2
α=1,0
α=0,8
$\alpha=\frac{L}{2\sqrt{\beta t}}$
α=0÷0,7
α=0,8
0,6 0,7 0,8 0,9 1,0
$\lambda=\frac{x-b;}{l}$
$\frac{x+b}{l}$
0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5
α=0÷0,7
α=1,0
α=1,2
α=1,4
α=1,6
α=1,8
α=2,0

Рис. 45.

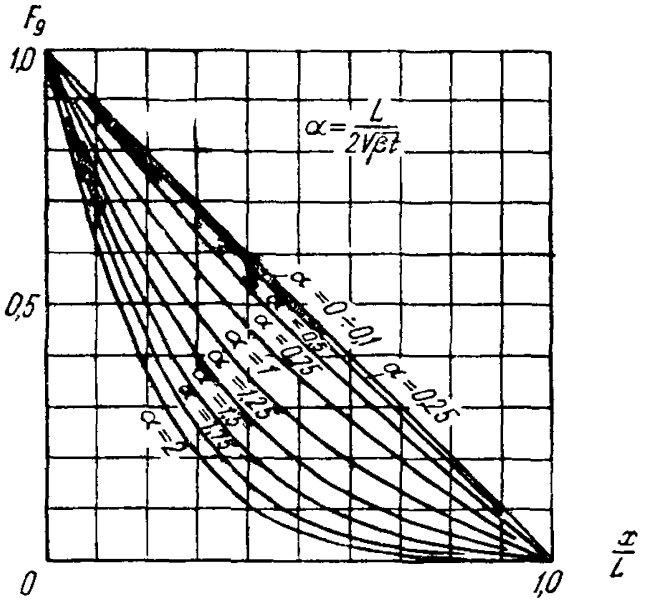

F_9
1,0
0,5
0
1,0
$\frac{x}{L}$
$\alpha=\frac{L}{2\sqrt{\beta t}}$
α=0÷0,1
α=0,25
α=0,5
α=0,75
α=1
α=1,25
α=1,5
α=2

Рис. 46.

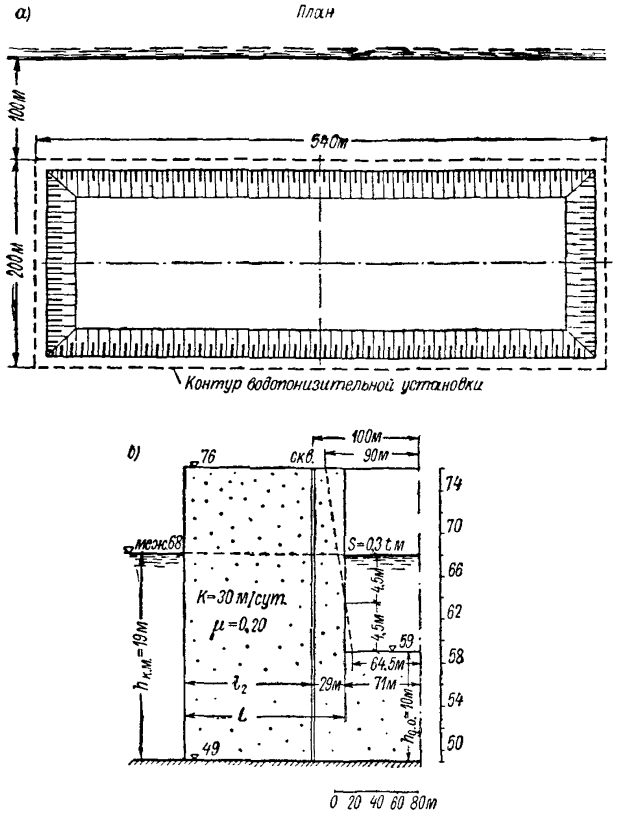

а)
План
100м
540м
200м
Контур водопонизительной установки
б)
100м
90м
76
скв.
меж.68
S=0,3 t м
K=30 м/сут.
μ=0,20
4,5м
4,5м
59
64,5м
71м
29м
l_2
l
$h_{к.м.}$=19м
$h_{д.о.}$=10м
49
74
70
66
62
58
54
50
0 20 40 60 80м

Рис. 47.

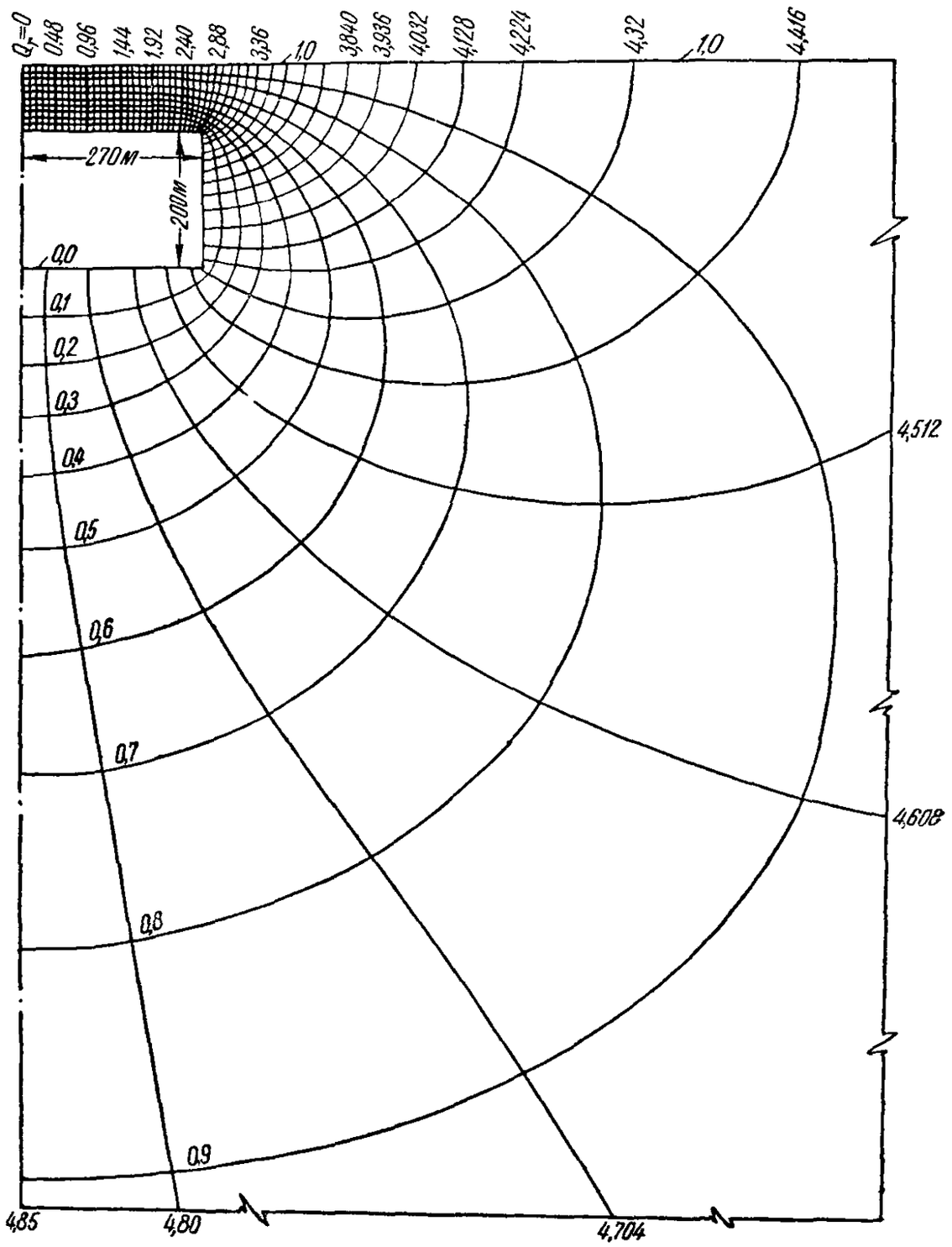

Q_r=0
0,48
0,96
1,44
1,92
2,40
2,88
3,36
1,0
3,840
3,936
4,032
4,128
4,224
4,32
1,0
4,416
270м
200м
0,0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
4,512
4,608
4,85
4,80
4,704

Рис. 48-*а*.

водится на рис. 47-*а*, *б*. Котлован разрабатывается способом гидромеханизации. Срок первоначальной откачки (открытого водоотлива и первичного осушения грунта) принимается равным $t_к = 30$ *сут*, что отвечает скорости понижения открытых вод $v_0 = \dfrac{h_{к.м} - h_{д.м}}{t_к} = \dfrac{19-9}{30} \cong 0{,}3$ *м/сут*.

В остальном исходные данные одинаковы с таковыми для примера к § 13 п. *б*.

Расчет выполняем по лентам тока сетки движения, построенной методом ЭГДА для условий установившегося режима фильтрации в предположении, что контур установки в плане является эквипотенциальной линией. Сетка приводится на рис. 48-*а*. Рассмотрение сетки показывает, что всю область фильтрации

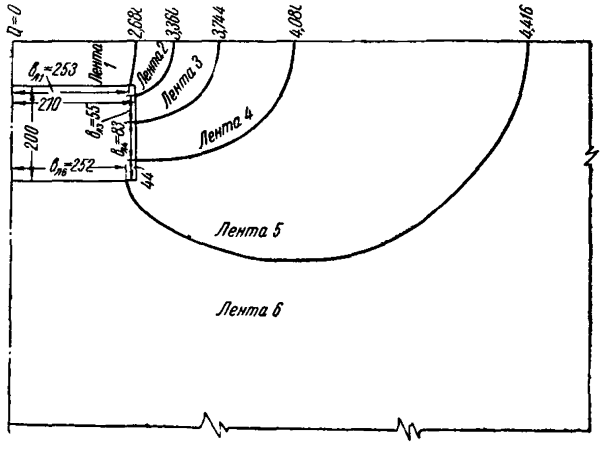


Рис. 48-*б*.

можно разделить на 12 расчетных лент тока (6 лент для каждой симметричной половины), в пределах которых удельный дебит можно считать практически постоянным (рис. 48-*б*). Приведенная длина $L_л$ и ширина $b_л$ лент тока и другие основные результаты расчета при установившемся режиме в межень приводятся в таблице III-8.

Заметим, что для перехода от приведенных значений дебита $Q_{гл}$ к действительным следует первые умножить на величину $\dfrac{k}{2}\left(h^2_{к.м} - h^2_{д.м}\right) = \dfrac{30}{2}(19^2 - 9^2) = 4200$ *м³/сут*.

Для расчетов применительно к условиям первоначальной откачки предварительно находим по (П, 20) (см. приложение 3)

$$\beta = \frac{30 \cdot 14{,}0}{0{,}20} = 2100 \text{ м}^2/\text{сут}$$

где $h_{ср} = \dfrac{19+9}{2} = 14$ *м*

и тогда

$$2\sqrt{\beta t_к} = 2\sqrt{2100 \cdot 30} = 510 \text{ м}.$$

Далее выполняем расчеты по (III, 13), где, учитывая (I, 3), полагаем

$$TS = Tv_0 t_к = \frac{1}{2}\left(h^2_{к.м} - h^2_{д.м}\right) = \frac{1}{2}(19^2 - 9^2) = 140 \text{ м}^2.$$

Таблица III-8

№ ленты	$Q_{гл}$ —	$b_л$, м	$L_л = \frac{b_л}{Q_{гл}}$, м	$Q_л$, м³/сут	$Q_с$ (АТН-8-1-7) м³/сут	$n_{с.л} = \frac{Q_л}{Q_с}$, шт.	σ, м
1	2,69	253	94	11300	720	16	15,8
2	0,67	33	49	2820	720	4	8,2
3	0,38	55	145	1590	720	2	27,5
4	0,34	83	244	1430	720	2	41,5
5	0,34	62	182	1430	720	2	31,0
6	0,43	252	590	1800	720	2,5	100,8
Всего	2×4,85	2×740	—	2×20370	—	2×28,5	—

Как ясно из таблиц, дебиты скважин в период первоначальной откачки и в период поддержания проектных уровней в межень близки друг другу. Дополнительные скважины следует установить только на наиболее удаленном от реки участке контура установки (в пределах ленты № 6). Вычисляем глубину воды в дополнительных скважинах по (III, 14), полагая согласно (1, 3)

$$S_с = \frac{h_0^2 - h_с^2}{2T} \text{ и } TS = Tv_0t_к = \frac{1}{2}\left(h^2_{к.м} - h^2_{д.м}\right) = 140\ м^2.$$

Из табл. III-9 $\frac{L}{2\sqrt{\beta t_к}} = 1{,}21$; $\frac{l_1}{L} = 0{,}047$; $\frac{2l_1}{L} = 0{,}094$. По рис. 45 находим $F_2(0;\ 1{,}21) = 0{,}018$, $F_2(0{,}094;\ 1{,}21) = 0{,}016$, а по рис. 46 $F_9(0{,}047;\ 1{,}21) = 0{,}88$.

Принимаем $d_с = 0{,}25$ м и, имея в виду, что $\sigma = 50{,}4$ м, находим по рис. 67 или (II, 2) $\Phi_к = 0{,}664$. Тогда по (III, 14) с учетом (I, 3) и с помощью табл. III-8 и III-9

$$\frac{h_0^2 - h_с^2}{2} = \frac{1000}{30 \cdot 50{,}4}\left[\frac{29 \cdot 580}{619} - 619\,(0{,}018 - 0{,}016)\right] +$$

$$+ 140 \cdot 0{,}88 + \frac{1000}{30} \cdot 0{,}664 = 165;$$

$$h_с = \sqrt{19^2 - 2 \cdot 165} = 5{,}6\ м;\quad S_с = 19 - 5{,}6 = 13{,}4\ м.$$

§ 17. Определение времени разгрузки напорных горизонтов

При наличии под дном котлована напорного горизонта может возникнуть опасность взвешивания основания котлована под влиянием избыточного напора. Если обозначить напор в горизонте относительно дна котлована через ΔH, а мощность основания до

Таблица III-9

№ ленты	$b_л$ (табл. III-8),	$l_2 = L_л$ (табл. III-8; рис. 47),	l_1 (рис. 47),	$L = l_2 + l_1$,	$\frac{L}{2\sqrt{\beta t_к}}$	F_{10} (рис. 44)	$\frac{l_1}{L}$	F_3 (рис. 43)	$Q_{л.\,о}$ (по III, 13),	$Q_{л.\,м}$ (табл. III-8),	$\Delta Q_{л.\,о} =$ = (10)—(11) (см. III, 2),	$n_{с.\,л}$ (табл. III-8),	$n_с\,(Q_{с.\,пр} - Q_{с.\,опт}) =$ $= n_с(1008-720)$,	$n'_{с.л}$ (см. III, 3),	$Q_с = \frac{Q_{л.\,о}}{n_{с.\,л} + n'_{с.\,л}}$,
—	*м*	*м*	*м*	*м*	—	—	—	—	*м³/сут*	*м³/сут*	*м³/сут*	шт.	*м³/сут*	шт.	*м³/сут*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	253	95	29	124	0,242	1,04	0,234	0,76	11700	11300	400	16	4600	0	730
2	33	48	29	77	0,152	1,00	0,372	0,62	2880	2820	60	4	1150	0	720
3	55	145	29	174	0,339	1,16	0,167	0,84	1840	1590	250	2	576	0	920
4	83	244	29	273	0,534	1,36	0,106	0,89	1950	1430	520	2	576	0	970
5	62	182	29	211	0,412	1,24	0,137	0,86	1790	1430	360	2	576	0	890
6	252	580	29	619	1,210	2,70	0,047	0,93	4960	1800	3160	2,5	720	2,5	1000
Всего		—	—	—	—	—	—	—	2×25220	2×20370	4750	28,5	8198	2,5	—

Примечание. Цифры, поставленные в скобки, обозначают математические выражения в соответствующих графах.

напорного пласта через T, то условие безопасности основания против взвешивания определится неравенством

$$\Delta H \leqslant \frac{\gamma_{осн} T}{k_{зап}}, \qquad \text{(III, 15)}$$

где $\gamma_{осн}$ — объемный вес грунтов в основании котлована (с учетом взвешивания в воде);

$k_{зап}$ — коэффициент запаса.

Поскольку в условии (III, 15) не учитывается сцепление, то можно принимать $k_{зап} = 1{,}0$. Если условие (III, 15) не выполняется, то встает вопрос о необходимости устройства системы разгрузочных скважин в напорном горизонте.

При проектировании системы такого рода скважин прежде всего следует определить, каково время разгрузки и насколько это время является приемлемым с точки зрения строительства. Особенно актуальной эта задача является при разгрузке в слабопроницаемых грунтах (при $k < 1$ *м/сут*) и для котлованов достаточно больших (порядка сотен метров) размеров в плане.

Время разгрузки определяется упругим режимом фильтрации, основные представления о котором вместе с выводом уравнений приведены в приложении 3.

Важное значение для водопонижения представляет определение условий питания напорных горизонтов. Обычно питание напорных горизонтов осуществляется либо в местах их выхода на поверхность и контакта с другими, более водообильными горизонтами, либо за счет перетекания из соседних горизонтов, отделенных слабопроницаемыми прослоями. Наиболее характерным примером схемы с перетеканием является подпитывание напорного горизонта из аллювиального.

В связи с изложенным определяются две типовые расчетные схемы: однородный пласт и пласт при наличии перетекания. Для схемы с перетеканием принимается, что подпитывающий горизонт является значительно более водообильным и напор в нем в процессе водопонижения не изменяется, т. е. за основу здесь принимается схема А. Н. Мятиева — Н. К. Гиринского [Л. 19].

Для этих схем рассматриваются два типовых условия на скважинах: а) постоянный дебит скважин в процессе водопонижения и б) постоянное понижение на скважинах.

Первое из этих условий характерно для песчаных горизонтов, а второе — для песчано-глинистых и суглинистых (при $k < 0{,}1$—$0{,}5$ *м/сут*).

а. Скважины с постоянным дебитом

В этом случае расчеты выполняются по тем же общим зависимостям и в том же порядке, что и расчеты осушения грунта (см. § 12).

Для однородного пласта следует прямо пользоваться формулой (III, 1) и формулами табл. III-1, заменяя только при определении функций понижения параметр Буссинеска β на коэффициент пьезопроводности a (см. приложение 3).

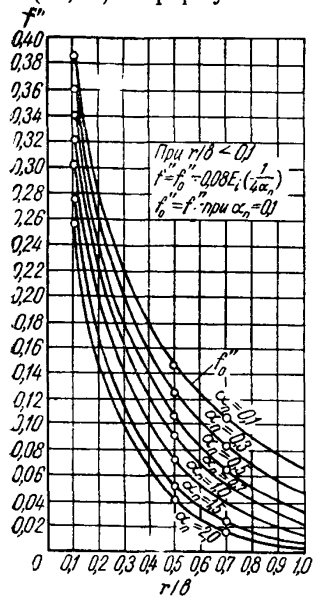


Рис. 49.

При наличии перетекания (подпитывания) из соседних горизонтов его влияние характеризуется коэффициентом перетекания b, определяемым как

$$b = \sqrt{\frac{k}{k_1} TT_1}, \qquad \text{(III, 16)}$$

причем величина b определяет размер области питания водоносного горизонта, образуемой за счет перетекания.

Для этой схемы (пласт с перетеканием) дебит группы скважин Q определяется по формуле

$$Q = \frac{kTS_к}{f_к''}, \qquad \text{(III, 17)}$$

где $S_к$ — понижение под котлованом (в характерной расчетной точке), а $f_к''$ — функция понижения для пласта с наличием перетекания, определяемая по графику рис. 49 в зависимости от отношения $\frac{r}{b}$ и величины $\alpha_п = \frac{b^2}{4at}$, при $r = r_к$; b — определяется по (III, 16).

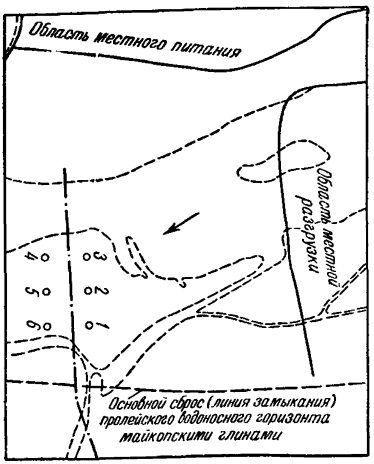


Рис. 50.

Определив дебит системы, необходимый для обеспечения заданного времени разгрузки $t_к$, следует проверить величину понижения напора в характерных скважинах с тем, чтобы эта величина не превышала допустимой. Расчет понижения в скважине $S_с$ ведется по формуле

$$S_с = \frac{Q}{kT} f_с'', \qquad \text{(III, 18)}$$

причем величина f_c'' определяется по графику рис. 49 при $r=r_э$; величина $r_{ср}$ определяется для расчетной скважины по общей зависимости (II, 1).

Пример расчета. Проведем расчет системы разгрузочных скважин для пролейского водоносного горизонта, расположенного под котлованами Сталинградского гидроузла.

Геологический профиль для этих условий приведен в [Л. 21], а на рис. 50 показано расположение разгрузочных скважин в плане [1].

Расчет производится при следующих исходных данных:

$$k = 0{,}8\ м/сут;\quad a = 10^5\ м^2/сут;\quad T = 25\ м;\quad r_c = 0{,}15\ м.$$

По условиям строительства задается, что за время $t_к = 100$ *сут* напор под котлованом должен быть снижен на 25 *м* ($S_к = 25$ *м*).

Проведем прежде всего расчет без учета подпитывания пролейского горизонта и пренебрегая влиянием контуров пласта, которые находятся на значительном расстоянии от разгрузочных скважин.

Определяем потребный дебит скважин по формуле (III, 1), определяя предварительно радиус эквивалентного колодца по формуле (II, 1а), причем в силу симметрии

$$r_к = \sqrt[6]{r_1^4 r_2^2} = \sqrt[3]{r_1^2 r_2} = \sqrt[3]{520^2 \cdot 275} = 420\ м;$$

$$\alpha = \frac{r_к^2}{4at} = \frac{420^2}{4 \cdot 10^5 \cdot 100} = 0{,}00432;\quad f_{t_к} = -0{,}08\,(\ln 0{,}00432 + 0{,}58) = 0{,}386;$$

$$Q = \frac{0{,}8 \cdot 25 \cdot 25}{0{,}386} = 1300\ м^3/сут;$$

$$Q_c = \frac{Q}{6} = 216\ м^3/сут.$$

Проверим теперь уровень в скважине № 2.

Определяем эффективное расстояние до скважины № 2 от всех скважин (кроме расчетной) по формуле (II, 1)

$$\lg r_э = \frac{1}{5}\lg r_1^2 r_4^2 r_5 = \frac{1}{5}\lg 420^2 \cdot 640^2 \cdot 550 = 2{,}72;\quad r_э = 525.$$

Тогда эффективная функция понижения от всех скважин (кроме расчетной определится по формуле (a_0) табл. III-1 при $r_к = r_э$

$$\frac{r_э^2}{4at} = \frac{525^2}{4 \cdot 10^5 \cdot 100} = 0{,}0069;\quad Ei(-0{,}0069) = \ln 0{,}0069 + 0{,}577 = -4{,}4$$

$$f_c^э = 0{,}08 \cdot 4{,}4 = 0{,}352.$$

Определим теперь функцию понижения от самой расчетной скважины по формуле (a_0) табл. III-1 при $r_к = r_c = 0{,}15$ *м*

$$\frac{r_c^2}{4at} = \frac{0{,}15^2}{4 \cdot 10^5 \cdot 100} = 5{,}6 \cdot 10^{-10};\quad Ei(-5{,}6 \cdot 10^{-10}) = \ln 5{,}6 \cdot 10^{-10} + 0{,}58 = -20{,}7;$$

$$f_c = 0{,}08 \cdot 20{,}7 = 1{,}65.$$

Суммарная функция понижения по формуле (II, 7а) будет равна:

$$f_{сум} = 1{,}65 + 5 \cdot 0{,}352 = 3{,}41.$$

[1] В настоящем примере для упрощения техники расчетов принята система из шести скважин: в действительности же число одновременно работающих скважин достигало двадцати трех.

Тогда понижение в скважине № 2 S_c будет

$$S_c = \frac{Q_c}{kT} f_{сум} = \frac{216}{0{,}8 \cdot 25} \cdot 3{,}41 = 36{,}8 \text{ м}.$$

Это понижение не превосходит допустимого, так как уровень в скважине остается несколько выше кровли пролейского горизонта.

Проведем теперь расчет с учетом перетекания (подпитывания) из аллювиального горизонта, отделенного от пролейского пачкой алевролитовых и песчано-алевритовых пород мощностью около 40 *м*, принимая $k_I = 10^{-4}$ *м/сут*.

Определяем параметр перетекания b

$$b = \sqrt{\frac{0{,}8}{10^{-4}} \cdot 25 \cdot 40} = 2800 \text{ м}.$$

Находим теперь требуемый дебит системы по формуле (III, 17), определяя при $\frac{r_к}{b} = \frac{420}{2800} = 0{,}15$ и $\alpha_п = \frac{2800^2}{4 \cdot 10^5 \cdot 100} = 0{,}2$ по графику рис. 49 $f_к'' = 0{,}315$. Тогда

$$Q = \frac{0{,}8 \cdot 25 \cdot 25}{0{,}315} = 1590 \text{ м}^3/\text{час},$$

что примерно на 20% больше, чем расход, определенный без учета перетекания.

Если же принять $k_I = 10^{-3}$ *м/сут*, то оказывается $b = 900$ *м* и $Q = 3230$ *м*^{3}*/сут*, что в 2,5 раза превышает приток, определенный без учета перетекания. Таким образом, на этом примере ясно видно значение учета подпитывания напорных грунтов.

б. Скважины с постоянным понижением

Как указывалось выше, условие постоянного понижения характерно для малопроницаемых пластов. В этих случаях основной является двухрядная схема расположения скважин.

Таблица III-10

$\frac{r}{a}$ \ $\overline{S}$	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	0,95
0	0,06	0,10	0,15	0,19	0,26	0,34
0,10	0,11	0,18	0,30	0,42	0,68	—
0,25	0,19	0,34	0,62	0,97	2,70	—
0,50	0,30	0,59	1,40	2,70	8,30	—

При наличии двух рядов скважин, расположенных изолированно на расстоянии L друг от друга, время $t_к$, необходимое для достижения между рядами понижения S, может быть определено, как

$$t_к = \frac{L^2}{4a} \tau, \qquad \text{(III, 19)}$$

где безнапорный параметр τ, значения которого приведены в составленной по данным расчетов на гидравлическом интеграторе табл. III-10 в зависимости от величин

$$\bar{S}=\frac{S}{S_c} \text{ и } \bar{\sigma}=\frac{\sigma\Phi_к}{L},$$

причем S_c — понижение уровня в скважинах;
σ — расстояние между скважинами;
$\Phi_к$ — внутреннее сопротивление ряда скважин (см. приложение 1).

в. Учет влияния выемки котлована

Заметное влияние на разгрузку напорных горизонтов может оказывать разработка котлована, которая влечет за собой уменьшение давления на водоносный пласт со стороны вышележащих грунтов. В связи с уменьшением давления на пласт происходит определенная разгрузка напорного горизонта, вызывающая понижение его напора в районе расположения котлована. Величина этого понижения S' также зависит от упругого режима фильтрации и в средней части котлована в процессе его разработки может определяться по формуле

$$S=-\frac{G_к}{\gamma t}Ei\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right);\quad r_0=0{,}18P_к, \qquad \text{(III, 20)}$$

где $G_к$ — вес вынутого из котлована грунта (вместе с водой) за расчетный момент времени t;
$P_к$ — средний периметр котлована.

После разработки котлована напор начинает постепенно восстанавливаться и в этом случае величина его понижения (от статического уровня) определяется по формуле

$$S=\frac{G_к}{\gamma t_к}\left\{-Ei\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right)+Ei\left[-\frac{r_0^2}{4a(t-t_к)}\right]\right\}, \qquad \text{(III, 21)}$$

где $t_к$ — период полной разработки котлована.

Влияние выемки котлована на разгрузку напорного горизонта сказывается также и в том, что при наличии гидравлической связи (перетекания) между напорным горизонтом и горизонтом, который прорезается котлованом, осушение котлована приводит к тому, что он становится областью дренирования напорного горизонта.

Пример расчета. Приведем расчет понижения напора за счет разработки котлована для условий предыдущего примера при $B=500$ *м*. Разработка основной части котлована на глубину $\Delta h_к=25$ *м* производилась в течение 100 *сут*. При определении величины $\Delta p_к$ принимаем объемный вес насыщен-

ного водой грунта $\gamma_{гр} = 2\ т/м^3$. Тогда $\Delta p_к = \gamma_{гр}\Delta h_к = 2 \cdot 25 = 50\ т/м^2$ и $\frac{\Delta p_к}{\gamma} = 50\ м$. При $a = 10^5\ м^2/сут$ и $t_к = 100\ сут$ получаем

$$\lambda = \frac{500}{4\sqrt{10^5 \cdot 100}} = 0{,}04.$$

По таблице III-10 находим $\pi(0{,}04) = 0{,}09k$ и согласно (III, 20) имеем

$$S' = 50 \cdot 0{,}09 = 4{,}5\ м.$$

Примерно такое понижение напора наблюдалось при разработке котлована ГЭС Сталинградского гидроузла.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ВОДОПОНИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ПРОЕКТНЫХ УРОВНЕЙ В ПАВОДОК

§ 18. Общие положения

Внешняя граница пласта, образованная урезом воды в реке, где проходит паводок, изменяет очертание в плане и местоположение по отношению к водопонизительной установке в зависимости от уровня воды. Однако при расчетах в рассматриваемом случае эту границу, как правило, следует считать неподвижной

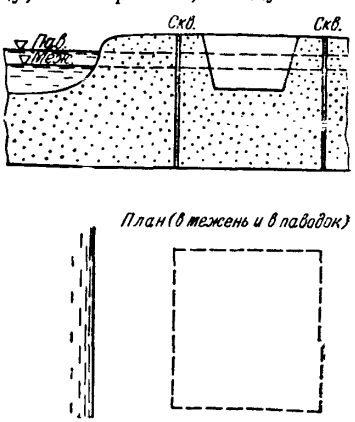
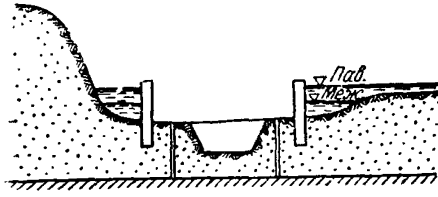


Рис. 51.

и по очертанию и по местоположению соответствующей наивысшему уровню воды в реке в паводок.

Для береговых котлованов, т. е. для котлованов, расположенных в некотором удалении от водотока и сооружаемых без перемычек, очертание и местоположение границы, соответствующей

максимальному уровню воды в реке, можно практически считать такими же, как для границы, соответствующей меженному горизонту (рис. 51). В этом случае при расчетах в паводок водоносный пласт приводится к той же схеме, что и в межень. Аналогичное замечание необходимо сделать и относительно котлованов, полностью расположенных в русле реки и сооружаемых за перемычками (см. рис. 52).



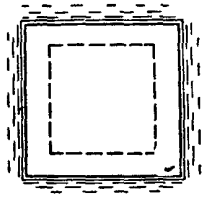


Рис. 52.

Для котлованов, полностью или частично расположенных на пойме (пойменно-русловые, пойменные, пойменно-береговые) и сооружаемых за перемычками, очертание и местоположение границы, соответствующей максимальному уровню воды в реке, могут значительно отличаться от таковых для границы, соответствующей меженному горизонту в реке. Это отличие может быть столь существенным, что в межень и в паводок приходится использовать различные расчетные схемы. Так, например, для водопонизительной установки, изображенной на рис. 53, при расчетах в межень водоносный пласт можно считать полуограниченным в плане, а при расчетах в паводок — ограниченным замкнутым контуром питания.

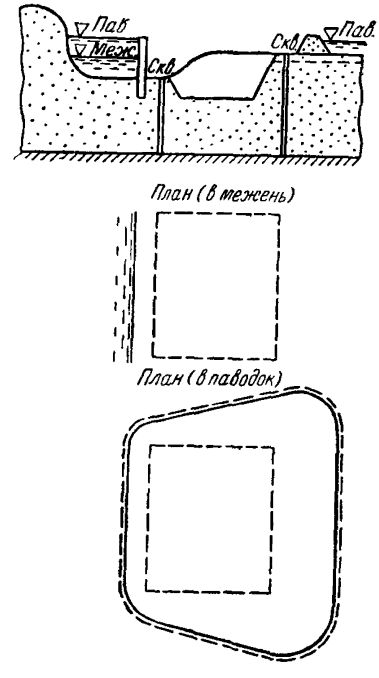


Рис. 53.

Таким образом, схема котлована в пласте, ограниченном замкнутым контуром питания, часто называемая *речным котлованом*, характерна в паводок для пойменных, пойменно-русловых и русловых котлованов, причем в последнем случае имеет место единая схема как в паводок, так и в межень. Заметим, что, если котлован сооружается за перемычками, то в паводок пласт приводится к схеме, характеризуемой сложными условиями

питания, так как в этих случаях естественные контуры питания вблизи водопонизительной установки нарушаются, следуя за очертаниями перемычек. Если, однако, территория, огражденная перемычками, имеет в плане невытянутую форму (при отношении наибольшей протяженности в плане к наименьшей не более $1{,}5 \div 2{,}0$), то может быть использована схема кругового пласта

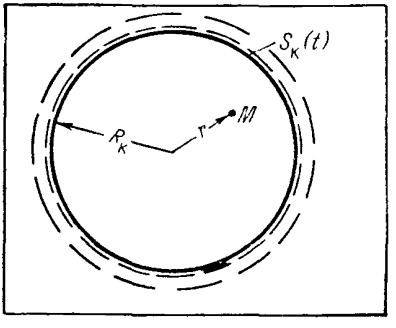


Рис. 54.

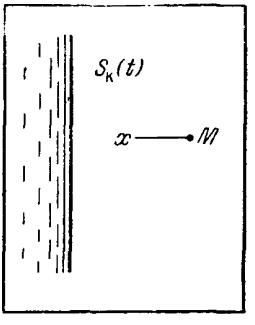


Рис. 55.

(рис. 54), относящаяся к типовым схемам. Эта же схема может быть использована и для берегового котлована в пласте, контуры питания которого располагаются с разных сторон от котлована, причем размеры последнего значительно менее размеров пласта.

Схема котлована в пласте, имеющем разомкнутые контуры питания, один из которых, ближайший к котловану, расположен по одну сторону от последнего, часто называется собственно береговым котлованом. Эта схема характерна в паводок для пойменно-береговых и береговых котлованов, причем в последнем случае имеет место единая схема как в паводок, так и в межень. Если ближайший к котловану контур питания может практически считаться прямолинейным, то для расчетов в паводок используется схема полуограниченного пласта с прямолинейным контуром питания (рис. 55), относящаяся к типовым схемам.

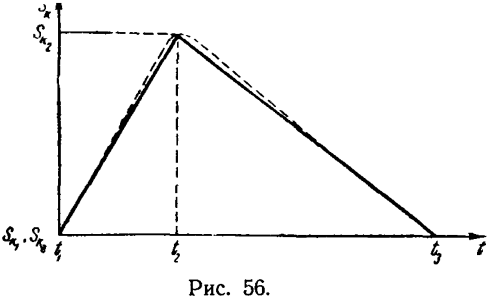


Рис. 56.

Для расчетов водопонижения в паводок график повышения уровней воды в реке над меженним горизонтом ($S_к(t)$) достаточно заменить треугольным графиком (рис. 56). Дальнейшие расчеты зависят от того, какие условия (типовые или сложные) имеют место в паводок.

§ 19. Расчет водопонизительных установок в типовых условиях

В паводок можно допустить меньшее понижение уровней грунтовых вод ($S_{д.\,п}$), чем в межень (см. § 1). Поэтому для расчета водопонизительных установок в период поддержания проектных уровней в паводок прежде всего необходимо оценить влияние последнего на уровни грунтовых вод, предполагая сначала, что в паводок установка эксплуатируется с тем же дебитом, что и в межень.

Тогда понижение уровней грунтовых вод в любой точке и в любой момент времени определяется по формуле

$$S_t = S_у - S_{tп}\ , \qquad \text{(IV, 1)}$$

где $S_у$ — понижение уровня грунтовых вод в рассматриваемой точке при установившемся режиме фильтрации и эксплуатации установки с меженным дебитом (см. гл. II);

$S_{tп}$ — повышение уровня грунтовых вод в паводок над меженным уровнем, обусловленное только повышением уровней воды в реке.

Повышения уровней $S_{tп}$ находятся для центра котлована, а для контурных систем скважин также и в нескольких точках на контуре водопонизительной установки. При этом следует определять максимальное повышение уровней за период паводка в каждой расчетной точке, что выполняется путем подбора по приводимым ниже формулам (IV, 3) или (IV, 4).

Радиус кругового пласта (рис. 54) $R_к$ определяется по формулам

$$R_к = \sqrt{\frac{F}{\pi}} \qquad \text{(IV, 2)}$$

или

$$R_к = \frac{P}{\pi},$$

где F — площадь пласта;

P — периметр замкнутого контура питания пласта.

Максимальное повышение уровней в расчетных точках для кругового пласта (рис. 54) подбирается по формуле

$$S_{tп} = \frac{S_{к_2}}{t_2}\, tF_{15}\left(\frac{r}{R_к}, \frac{R_к}{2\sqrt{3t}}\right) - \left(\frac{S_{к_2}}{t_2} + \frac{S_{к_2}}{t_3 - t_2}\right)(t - t_2)\, F_{15}\left(\frac{r}{R_к}, \frac{R_к}{2\sqrt{t - t_2}}\right). \qquad \text{(IV, 3)}$$

Здесь $S_{к_2}$ — максимальное повышение уровней воды на контуре питания по сравнению с меженным горизонтом (рис. 56);

t_2 — общее время подъема уровней на контуре питания;
t_3 — общая длительность подъема и спада уровней на контуре питания;
F_{15} — функция, значения которой определяются по графику на рис. 57 [Л. 17, 20,], где $\alpha = \frac{R_к}{2\sqrt{\beta t}}$ или $\frac{R_к}{2\sqrt{\beta(t-t_2)}}$;
t — время, отсчитываемое от начала паводка, причем для определения максимальной величины $S_{t\,п}$ следует задаться несколькими значениями $t_2 \leqslant t < t_3$.

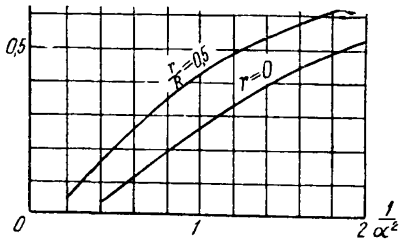


Рис. 57.

Максимальное значение $S_{t\,п}$ определяется по графику $S_{t\,п}(t)$.

Максимальное повышение уровней в расчетных точках для полуограниченного пласта с прямолинейным контуром питания (рис. 55) подбирается по формуле

$$S_{t\,п} = \frac{S_{к_2}}{t_2} t F_6\left(\frac{x}{2\sqrt{\beta t}}\right) -$$

$$- \left(\frac{S_{к_2}}{t_2} + \frac{S_{к_2}}{t_3 - t_2}\right)(t_1 - t_2) F_6\left(\frac{x}{2\sqrt{\beta(t-t_2)}}\right). \qquad \text{(IV, 4)}$$

Здесь x — расстояние от расчетной точки до контура питания;
F_6 — функция, определяемая по графику на рис. 58 [Л. 10].
Все другие обозначения одинаковы с таковыми в формуле (IV, 3).

Заметим, что в случае однородного безнапорного пласта повышения уровней S в формулах (IV, 3) (IV, 4) следует заменить

разностью квадратов соответствующих глубин по (I, 3). Тогда формула (IV, 4), например, принимает вид

$$h^2_{tп} - h^2_{к.м} = (h^2_{к_2} - h^2_{к.м}) \left[\frac{t}{t_2} F_6 \left(\frac{x}{2\sqrt{\beta t}} \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{t_3}{t_3 - t_2} \left(\frac{t}{t_2} - 1 \right) F_6 \left(\frac{x}{2\sqrt{\beta (t - t_2)}} \right) \right]. \qquad \text{(IV, 5)}$$

Здесь $h_{к.м}$ — глубина воды на контуре питания в межень;

$h_{к_2}$ — максимальная глубина воды на контуре питания в паводок;

$h_{tп}$ — глубина грунтовых вод в расчетной точке в момент времени t, обусловленная только повышением горизонта на контуре питания.

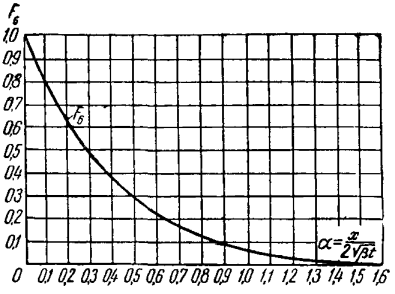


Рис. 58.

После определения максимальных значений $S_{tп}$ находятся понижения уровней S_t в паводок при эксплуатации установки с меженным дебитом (IV, 1). Понижения уровней S_t сравниваются далее с допустимым понижением в паводок $S_{д.п}$.

При $S_t \geqslant S_{д.п}$ дополнительные водопонизительные средства в паводок не требуются.

При $S_t < S_{д.п}$ дебит установки в паводок ($Q_п$) должен превышать дебит ее в межень ($Q_м$). Дополнительный дебит водопонизительной установки в паводок $\Delta Q_п = Q_п - Q_м$ определяется величиной дополнительного понижения ΔS, которое вычисляется по формуле

$$\Delta S = S_{д.п} - S_t, \qquad \text{(IV, 6)}$$

где S_t — находится по (IV, 1), а все остальные обозначения указаны на рис. 59.

Общий дополнительный дебит установки в паводок оценивается по формуле

$$\Delta Q_{\text{п}} = \frac{\Delta S(M_0)}{S_{\text{у}}(M_0)} Q_{\text{м}}, \qquad \text{(IV, 7)}$$

где $S_{\text{у}}(M_0)$ — понижение в центре котлована при установившемся режиме фильтрации и меженном горизонте воды на контуре питания;

$\Delta S(M_0)$ — дополнительное понижение в центре котлована, вычисленное по (IV, 6);

$Q_{\text{м}}$ — общий дебит установки при установившемся режиме фильтрации и меженном горизонте воды на контуре питания.

Для крупных водопонизительных установок расчет следует уточнить, определяя дополнительный дебит $\Delta Q_{\text{п}i}$ для каждого участка контура, причем

$$\Delta Q_{\text{п}i} = \frac{\Delta S_i}{S_{\text{у}i}} Q_{\text{м}i}. \qquad \text{(IV, 8)}$$

Здесь $S_{\text{у}i}$ — расчетное понижение уровня на участке при установившемся режиме фильтрации и меженном горизонте на контуре[1];

ΔS_i — дополнительное понижение в той же точке, вычисленное по (IV, 6);

$Q_{\text{м}i}$ — общий дебит участка при установившемся режиме фильтрации и меженном горизонте на контуре.

Заметим, что если расчетные схемы в паводок и в межень совпадают, то понижения $S_{\text{у}}$ и $S_{\text{у}i}$ известны по расчету для периода поддержания проектных уровней в межень. Если же расчетные схемы в паводок и в межень различны, то для определения $S_{\text{у}}$, $S_{\text{у}i}$ в формулах (IV, 1),(IV, 7), (IV, 8) необходимо вновь провести расчеты для схемы в паводок в соответствии с указаниями гл. II. При этом очертание границ пласта принимается таким же, как в паводок, но на контуре питания задается меженний горизонт воды.

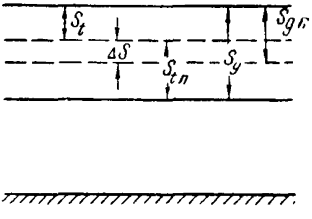


Рис. 59.

Для однородного безнапорного потока понижения в формулах (IV, 1), (IV, 6), (IV, 7), (IV, 8) следует заменить разностью квадратов соответствующих глубин согласно (I, 3).

Предполагается, что в паводок скважины эксплуатируются с дебитом $Q_{\text{с.пр}}$, соответствующим предельной производительности

[1] Расчетное понижение принимается равным понижению в середине участка, если он расположен вдоль направления распространения паводка, и минимальному понижению на участке, если он расположен поперек названного направления.

насосов. Тогда дополнительные скважины требуются только, если $\Delta Q_п > n_с (Q_{с.\,пр} - Q_{с.\,опт})$, где $Q_{с.\,опт}$ — дебит скважины, соответствующий оптимальной производительности насоса, причем общее количество дополнительных скважин $n_с''$ или дополнительное количество скважин $n_{сi}''$ для каждого участка определяется по формуле (III, 3), в которой вместо ΔQ_0 следует иметь в виду $\Delta Q_п$ или $\Delta Q_{пi}$.

Дополнительный дебит в паводок ($\Delta Q_п$) сравнивается с дополнительным дебитом в первоначальную откачку (ΔQ_0), причем система основных и дополнительных скважин, эксплуатируемых в первоначальную откачку, принимается в качестве исходной. Если $\Delta Q_п > \Delta Q_0$, то местоположение основных и дополнительных скважин для первоначальной откачки не изменяется, но к ним добавляются скважины с тем, чтобы общее количество дополнительных скважин было равно количеству, требуемому в паводок. Если $\Delta Q_п < \Delta Q_0$, то в системе основных и дополнительных скважин для первоначальной откачки отключаются на период паводка излишние дополнительные скважины.

Пример расчета. Требуется выполнить фильтрационный расчет водопонизительной установки в паводок для котлована, разрабатываемого насухо и характеризуемого исходными данными, приведенными в § 13, п. *б*, рис. 36.

Принимаем норму осушения в паводок не менее 0,3 *м* по сравнению с отметкой дна котлована, чему соответствует допустимое понижение $S_{д.п} = 9{,}3$ *м* и глубина $h_{д.п} = 9{,}7$ *м*. Ход уровней в реке $S_к(t)$ над меженним уровнем задается в виде треугольного графика, характеризуемого следующими величинами (см. рис. 56):

Таблица IV-1

$S_{к1}$, *м*	$S_{к2}$, *м*	$S_{к3}$, *м*	t_1, *сут*	t_2 *сут*	t_3, *сут*
0	7	0	0	30	75

Таблица IV-2

x, *м*	t_{ext}, *сут*	$(S_{tп})_{макс}$, *м*
100	35	5,4
200	39	4,1
300	45	3,2

Определяем максимальное повышение уровней $S_{tп}$ с помощью (IV, 5) на расстояниях $x = 100$, 200, 300 *м*. Вычисления проводим в табличной форме. В качестве примера приводится таблица вычислений при $x = 200$ *м*. Коэффициент уровнепроводности для периода паводка по (II, 20)

$$\beta = \frac{30 \cdot 17{,}9}{0{,}2} = 2680 м^2/сут, \quad \text{где } h_{ср} = \frac{(19 + 7) + 9{,}7}{2} = 17{,}9 м.$$

Таблица IV-3

x, м	t, сут	$\sqrt{t}$, $сут^{1/2}$	$\frac{x}{2\sqrt{\beta t}}$	$F_6\left(\frac{x}{2\sqrt{\beta t}}\right)$ по рис. 58	$\frac{t}{t_2}$	(5) × (6)	$t - t_2$, сут	$\sqrt{t - t_2}$, $сут^{1/2}$	$\frac{x}{2\sqrt{\beta(t-t_2)}}$	$F_6\left(\frac{x}{2\sqrt{\beta(t-t_2)}}\right)$ по рис. 58	$\frac{t_3}{t_3 - t_2}\left(\frac{t}{t_2} - 1\right)$	(12) × (11)	$h^2_{tп} - h^2_{к.м}$ (по IV, 5), $м^2$	$h^2_{tп} = (14) + h^2_{к.м}$, м	$h_{tп}$, м	$S_{tп} = h_{tп} - h_{к.м}$, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
200	4	2	0,862	0,090	0,13	0,01	—	—	—	—	—	—	3,1	364	19,1	0,1
	16	4	0,431	0,340	0,4	0,13	—	—	—	—	—	—	41,0	402	20,1	1,1
	30	5,48	0,315	0,470	1,0	0,47	—	—	—	—	—	—	147	508	22,6	3,6
	32	5,66	0,305	0,480	1,07	0,51	2	1,41	1,22	0,024	0,12	0,002	160	521	22,8	3,8
	34	5,83	0,296	0,490	1,13	0,55	4	2	0,862	0,090	0,17	0,015	169	530	23,0	4,0
	36	6	0,288	0,500	1,20	0,60	6	2,45	0,705	0,160	0,33	0,053	172	533	23,1	4,1
	40	6,31	0,274	0,520	1,33	0,69	10	3,16	0,546	0,250	0,55	0,137	174	535	23,1	4,1
	49	7	0,247	0,560	1,63	0,91	19	4,36	0,396	0,375	1,05	0,394	164	525	22,9	3,9
	75	8,65	0,199	0,630	2,50	1,58	45	6,71	0,257	0,540	2,50	1,350	73	434	20,8	1,8

Примечание. Цифры, поставленные в скобки, обозначают математические выражения в соответствующих графах.

Для наглядного сопоставления повышения уровней грунтовых вод в паводок по сравнению с повышением уровней воды в реке над меженним горизонтом на рис. 60 приводим графики при $x = 100, 200, 300$ *м*. По графикам находим максимальное значение $(S_{tп})_{макс}$ и соответствующее ему время t_{ext} (см. табл. IV-2).

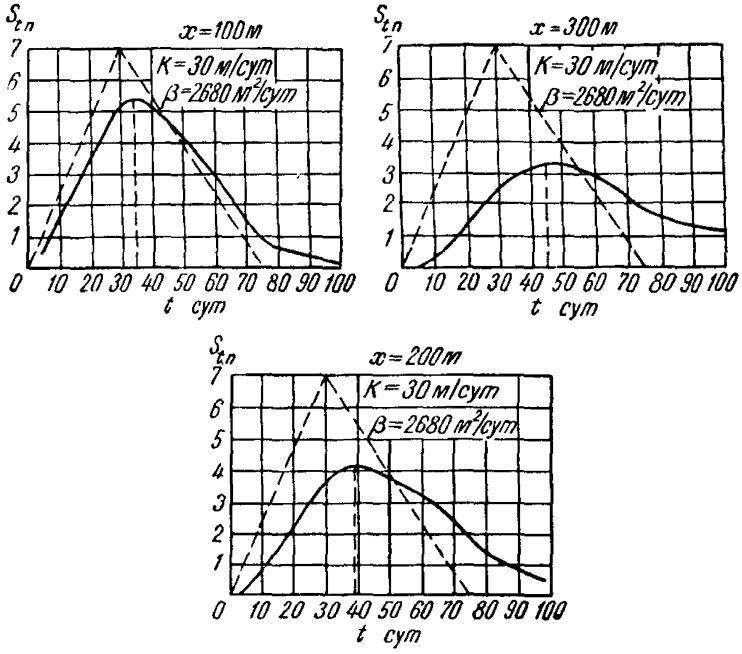


Рис. 60.

Определяем далее дополнительные дебиты $\Delta Q_п$, $\Delta Q_{пi}$ по (IV, 7), (IV, 8), заменяя понижения разностью соответствующих глубин согласно (I, 3).

В центре котлована (точка III) по расчетам для установившегося режима в межень

$$\frac{h^2_{к.м} - h^2_{м}}{2} = 154\ м^2; \quad \frac{h^2_{tп} - h^2_{к.м}}{2} = 87{,}5\ м^2; \text{ (см. табл. IV-2);}$$

$$\frac{h^2_{к.м} - h^2_{м}}{2} - \frac{h_{tп} - h^2_{к.м}}{2} = 154 - 87{,}5 = 66{,}5\ м^2;$$

$$\frac{h^2_{к.м} - h^2_{д.п}}{2} = \frac{19^2 - 9{,}7^2}{2} = 133{,}5\ м^2;$$

$$\frac{h^2_{к.м} - h^2_{д.п}}{2} - \left(\frac{h^2_{к.м} - h^2_{м}}{2} - \frac{h^2_{tп} - h^2_{к.м}}{2}\right) = 133{,}5 - 66{,}5 = 67{,}0\ м^2;$$

$$\Delta Q_п = \frac{67}{154} \cdot 43380 = 18900\ м^3/сут, \quad n_с (Q_{с.пр} - Q_{с.опт}) =$$

$$= 61\,(1008 - 720) = 17600\ м^3/сут$$

(см. пример расчета к § 13, п. *б*) и количество дополнительных скважин на период паводка $n_с'' = \frac{18900 - 17600}{1008} \cong 1$ шт. Проверяем далее необходимость установки дополнительных скважин по участкам.

Таблица IV-4

№ линии	$\frac{h^2_{к.м} - h^2_{м}}{2}$, $м^2$	$\frac{h^2_{гп} - h^2_{к.м}}{2}$, $м^2$	(2) — (3), $м^2$	$\frac{h^2_{к.м} - h_{д.п}}{2}$, $м^2$	(5) — (4), $м^2$	$Q_{л.м}$ (табл. III-4), $м^3/сут$	$\Delta Q_{л.п} = \frac{(6)}{(2)}(7)$, $м^3/сут$	$n_{с.л}$ (табл. III-4), шт.	$n_{с.л}(Q_{с.пр} - Q_{с.опт})$, $м^3/сут$	$n''_{с.л} = \frac{(8)-(10)}{Q_{с.пр}}$, шт.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	140	116,5	23,5	133,5	110,0	22800	17900	32	9230	8
2	154	66,5	87,5	133,5	46,0	3780	1130	5	1440	0
3 и 4	154	87,5	66,5	133,5	67,0	8400	3640	12	3460	0

Примечание. Цифры, поставленные в скобки, обозначают математические выражения в соответствующих графах.

§ 20. Расчет водопонизительных установок в сложных условиях

Расчеты водопонизительных установок в сложных условиях выполняются по лентам тока сетки движения, построенной для условий установившегося режима фильтрации. При этом в качестве контура стока принимается контур водопонизительной установки, в качестве контура питания — контур питания в паводок.

Заметим, что для русловых и береговых котлованов обычно можно использовать ту же сетку движения, которая была построена для расчетов в межень. В других случаях для расчетов в паводок следует построить сетку специально.

а. Расчеты водопонизительных установок несовершенных котлованов

Для определения дополнительного дебита и дополнительного количества скважин выбирается несколько наиболее характерных лент тока, для которых и выполняются расчеты.

Схема, к которой приводятся ленты тока, представлена на рис. 61.

График изменения уровней на внешней границе пласта, соответствующей участку контура питания, заменяется треугольным графиком, как это указано в § 18 (рис. 56). Но при этом отсчет повышения уровней на контуре питания выполняется от меженного уровня с учетом поправки $\Delta S_к$, т. е. от уровня

$$h'_{к.м} = h_{к.м} + \Delta S_к, \qquad \text{(IV, 9)}$$

где

$$\Delta S_к = S_{д.м} - S_{д.п}, \qquad \text{(IV, 10)}$$

причем $S_{д.м}$, $S_{д.п}$ — допустимые понижения в межень и в паводок.

На контуре стока, которым является участок контура водопонизительной установки в пределах ленты тока, сохраняется постоянный уровень, соответствующий допустимому в паводок понижению ($S_{д.п}$). Таким образом, для определения дополнительного дебита следует задать на контуре питания повышение уровней по треугольному графику и на контуре стока — $S_к = 0$.

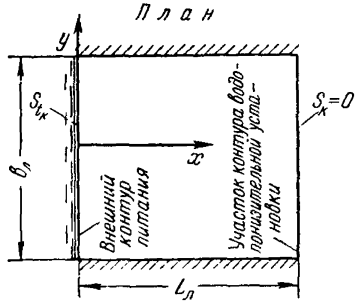


Рис. 61.

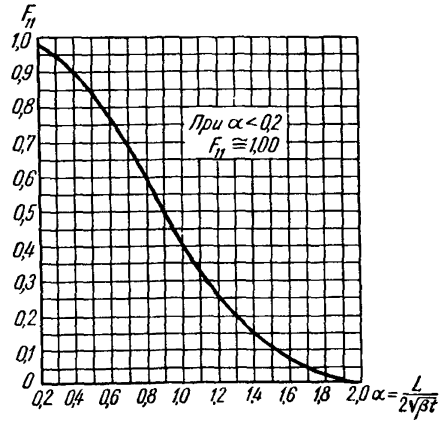


Рис. 62.

Максимальный дополнительный дебит $\Delta Q_{п.л}$ участка водопонизительного контура в пределах каждой ленты тока подбирается по формуле

$$\Delta Q_{п.л} = (kT)_{ср} \frac{b_л}{L_л} S_{к_2} \left[\frac{t}{t_2} F_{11}\left(\frac{L_л}{2\sqrt{\beta t}}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{t_з}{t_з - t_2}\left(\frac{t}{t_2} - 1\right) F_{11}\left(\frac{L_л}{2\sqrt{\beta(t - t_2)}}\right)\right]. \qquad \text{(IV, 11)}^1$$

Здесь $(kT)_{ср}$ — средняя проводимость в пределах ленты тока;

$L_л$ — приведенная длина ленты от внешнего контура питания до контура водопонизительной установки;

$b_л$ — ширина контура установки в пределах ленты;

$F_{11}(\alpha)$ — функция, значения которой находятся по графику на рис. 62.

---

[1] Для однородного безнапорного потока в (IV, 11) следует сделать замену согласно (I, 3):

$$(kT)_{ср} S_{к_2} = \frac{1}{2}\left[h^2_{к_2} - (h'_{к.м})^2\right].$$

Все другие обозначения одинаковы с таковыми в формуле (IV, 3), отсчеты повышения уровней ведутся от $h'_{к.м}$ (IV, 9), а отсчет времени выполняется от момента, когда глубина воды на контуре питания становится равной глубине $h_{к.м}$.

Максимальное значение $\Delta Q_{п.л}$ для каждой ленты находится по графику $\Delta Q_{п.л}(t)$, построенному по (IV, 11) при нескольких значениях $t_2 \leqslant t < t_3$.

Подбор дополнительного количества скважин выполняется так же, как это указано в § 19. Количество дополнительных скважин для тех лент тока, которые не рассчитывались, определяется умножением количества дополнительных скважин наиболее характерной ленты тока на отношение $\frac{n_{с.л_1}}{n_{л\text{-}сi}}$, где $n_{с.л_1}$, $n_{с.л_i}$ — количество основных скважин наиболее характерной первой и рассматриваемой i-ой ленты тока.

Пример расчета. Требуется выполнить фильтрационный расчет водопонизительной установки в паводок для котлована, разработанного способом гидромеханизации и характеризуемого исходными данными, приведенными в примере к § 16, рис. 47. Допустимое понижение в паводок и ход уровней в реке принимаются такими же, как и в примере к § 19.

По (IV, 10) $\Delta S_к = 10 - 9{,}3 = 0{,}7$ *м* и по (IV, 9) $h'_{к.м} = 19 + 0{,}7 = 19{,}7$ *м* определяем $\Delta Q_{п.л}$ для нескольких характерных лент тока, используя (IV, 11).

Отсчеты повышения уровней на границе ведутся над $h'_{к.м} = 19{,}7$ и поэтому в (IV, 11) следует иметь в виду

$$t_2 = \frac{30\ сут\,(7 - 0{,}7)\ м}{7\ м} = 27\ сут; \quad t_3 - t_2 = \frac{45\ сут\,(7 - 0{,}7)\ м}{7\ м} = 40{,}5\ сут;$$

$$t_3 = 27 + 40{,}5 = 67{,}5\ сут \text{ (см. табл. IV-1 и рис. 56)}; \quad \beta = 2680\ м^2/сут;$$

$$(kT)_{ср} S_{к_2} = \frac{1}{2}[h^2_{к_2} - (h'_{к.м})^2] = \frac{1}{2}(26^2 - 19{,}7^2) = 143{,}5\ м^2.$$

В качестве характерных лент тока выбираем ленты *1*, *4* и *6* (см. рис. 48-б) и определяем для них максимальное значение $\Delta Q_{п.л}$ путем подбора по формуле (IV, 11).

Таблица IV-5

№ ленты	$(\Delta Q_{л.п})_{макс}$ (из табл. IV-5), *м³/сут*	$n_{с.л}$ (из табл. III-8), шт.	$n_{с.л}\,(Q_{с.пр} - Q_{с.опт})$, *м³/сут*	(2) — (4), *м³/сут*	$\frac{(2) - (4)}{Q_{с.пр}}$ шт.
1	2	3	4	5	6
1	11600	13	4600	7000	6,5
4	1380	2	576	804	0,7
6	1280	2,5	720	560	0,5

Примечание. Цифры, заключенные в скобки, обозначают математические выражения в соответствующих графах.

Таблица IV-6

№ ленты	$b_л$ (из табл. III-8), *м*	$L_л$ (из табл. III-8), *м*	t, *сут*	$\frac{t}{t_2}$	$\frac{L_л}{2\sqrt{\beta t}}$	$F_{11}\left(\frac{L_л}{2\sqrt{\beta t}}\right)$ (по рис. 62)	$\frac{t}{t_2}F_{11}\left(\frac{L_л}{2\sqrt{\beta t}}\right)$	$t-t_2$, *сут*	$\frac{L_л}{2\sqrt{\beta(t-t_2)}}$	$F_{11}\left(\frac{L_л}{2\sqrt{\beta(t-t_2)}}\right)$ (по рис. 62)	$\frac{t_3}{t_3-t_2}\left(\frac{t}{t_2}-1\right)$	(11) × (12)	(8) — (13)	$\frac{b_л}{L_л}$	$\frac{k}{2}[h^2_{к_2}-h'^2_{к.м})^2]$, *м³/сут*	$\Delta Q_{п.л}$ по (IV, 11), *м³/сут*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	253	94	27	1,00	0,176	1,00	1,00	0	—	—	—	—	1,0	2,69	4300	11600
	253	94	30	1,11	0,165	1,00	1,11	3	0,52	0,81	0,184	0,149	0,961	2,69	4300	11100
4	83	244	27	1,00	0,454	0,86	0,86	0	—	—	—	—	0,860	0,34	4300	1260
	83	244	30	1,11	0,431	0,88	0,98	3	1,36	0,18	0,184	0,033	0,947	0,34	4300	1380
	83	244	33	1,22	0,410	0,89	1,08	6	0,96	0,45	0,368	0,165	0,915	0,34	4300	1330
6	252	590	36	1,33	0,95	0,46	0,61	9	1,90	0,01	0,551	0,007	0,604	0,43	4300	1120
	252	590	43	1,59	0,87	0,53	0,84	16	1,42	0,15	0,985	0,148	0,692	0,43	4300	1280
	252	590	49	1,82	0,815	0,58	1,05	22	1,21	0,26	1,37	0,356	0,694	0,43	4300	1280
	252	590	54	2,00	0,776	0,62	1,24	27	1,09	0,34	1,67	0,570	0,670	0,43	4300	1240

Примечание. Цифры, поставленные в скобки, обозначают математические выражения в соответствующих графах.

Расчеты по (IV, 11) для лент *2*, *3*, *5* не выполняем, принимая отношение между основными и дополнительными скважинами $\left(\frac{n_{с.л}}{n''_{с.л}}\right)$ для ленты *2*, как для ленты *1*, для ленты *3*, как для ленты *4* и для ленты *5*, как для ленты *6* (см. рис. 48, *б*). Так, например, для ленты *2* $n_{с.л} = 4$ и $\frac{(\Delta Q_{л.п})_{макс} - n_{с.л}(Q_{с.пр} - Q_{с.опт})}{Q_{с.пр}} = \frac{4}{16} 6{,}5 = 1{,}6$. Количество дополнительных скважин для всех лент тока приводим в табл. IV-7.

Таблица IV-7

№ ленты	$n_{с.л}$, шт.	$\frac{\Delta Q_{л\,п} - n_{с.л}(Q_{с.пр} - Q_{с.опт})}{Q_{с.пр}}$, шт.	$n''_{с.л}$, шт.	$n'_{с.л}$ (из табл. III-9), шт.	Всего дополнительных скважин, шт.
1	16	6,5	8	0	8
2	4	1,6		0	
3	2	0,7	1	0	1
4	2	0,7		0	
5	2	0,4	1	0	2,5
6	2,5	0,5		2,5	
					$2 \times 11{,}5 = 23$ шт.

б. Расчеты водопонизительных установок совершенных котлованов

При подъеме уровня реки в паводок происходит некоторое увеличение расхода потока, выходящего на откос котлована, что влечет за собой дополнительное обрушение (оплывание) откоса. Величина дополнительного погонного расхода Δq_0 определится в период паводка (с учетом неустановившегося характера фильтрации) для каждой из выбранных расчетных лент тока по формуле

$$\Delta q_0 = k \frac{h_{к_э}^2 - h_{к.м}^2}{2L_л} \left[\frac{t}{t_2} F_{11}\left(\frac{L_л}{2\sqrt{\beta t}}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{t_э}{t_э - t_2}\left(\frac{t}{t_2} - 1\right) F_{11}\left(\frac{L_л}{2\sqrt{\beta(t - t_2)}}\right)\right]. \qquad \text{(IV, 12)}$$

Здесь $h_{к_э}$ — максимальная глубина воды в паводок на контуре питания;

$h_{к.м}$ — глубина воды на контуре питания в межень;

F_{11} — функция, определяемая по графику на рис. 62.

Все другие обозначения одинаковы с таковыми в формуле (IV, 3).

Максимальная величина Δq_0 для каждой из выбранных расчетных лент тока определяется с помощью (IV, 12) путем подбора аналогично тому, как это указано в п. *а* настоящего параграфа для общего расхода $\Delta Q_{пl}$ в пределах ленты тока, (IV, 11). При этом следует задаваться значениями $t_2 \leqslant t < t_3$.

При форме паводковой волны, близкой к симметричной ($t_3 \cong 2t_2$), величину, стоящую в (IV, 12) в квадратных скобках и соответствующую максимальному значению расхода Δq_0, можно определять по графику рис. 63 (указанная величина обозначена $F_п$).

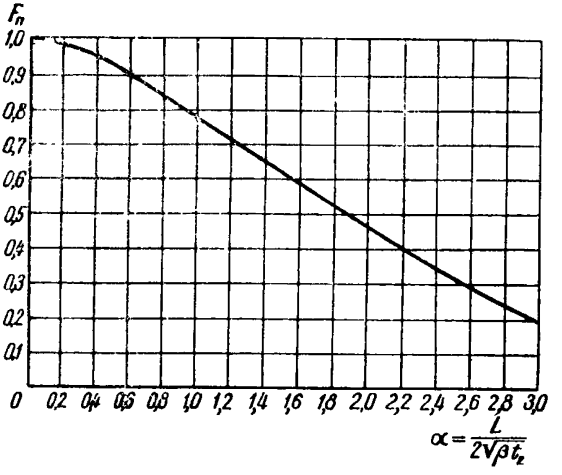


Рис. 63.

Определив величину Δq_0, следует проверить откос на оплывание при погонном расходе $q_0 + \Delta q_0$ так, как это показано в § 10 главы II. Если при этом размер оплывания оказывается больше допустимого, то следует интенсифицировать работу водопонизительных скважин с тем, чтобы погонный расход на откосе не превышал допустимой по условиям оплывания величины $q_0^{доп}$, которая определяется из условия, что размер оплывания должен находиться в пределах допустимого. Следовательно, водопонизительная установка должна быть рассчитана на перехват дополнительного потока с погонным расходом на откосе $\Delta q_0'$ таким образом, что

$$\Delta q_0' = q_0 + \Delta q_0 - q_0^{доп}. \qquad \text{(IV, 13)}$$

Общий дополнительный дебит в пределах ленты тока определяется по формуле

$$\Delta Q_{пl} = b_{лl} \Delta q'_{0l}, \qquad \text{(IV, 14)}$$

где $b_{лl}$ — длина участка контура водопонизительной установки рассматриваемой i-ой ленты тока;

$\Delta q'_{0l}$ — ее дополнительный погонный дебит, найденный по (IV, 13).

Подбор дополнительного количества скважин выполняется так же, как это указано в § 19.

В заключение настоящей главы отметим, что учет неустановившегося характера фильтрации в период паводка целесообразно производить лишь в том случае, если

$$L_{л} > \sqrt{\beta t_{п}}. \qquad \text{(IV, 15)}$$

В противном же случае в условиях паводка расчеты следует вести при установившемся режиме фильтрации.

Проверку уровней в скважинах в паводок можно не делать, так как они обычно не менее, чем в межень.

МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

При фильтрации грунтовых вод к контурной системе скважин, расположенных достаточно далеко от границ пласта, только вблизи скважин наблюдается изменение характера течения по сравнению с характером течения в большей части области фильтрации. Поэтому зону, где наблюдается изменение характера

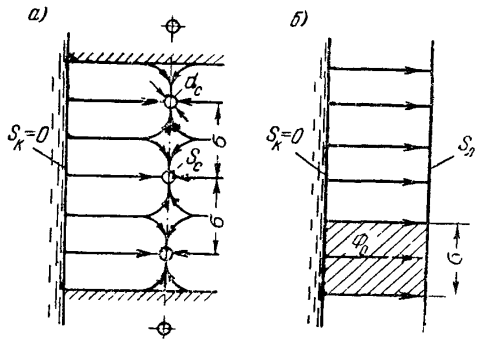


Рис. 64.

течения, можно рассматривать как зону местной деформации потока. Характерно, что при достаточной удаленности границ пласта от скважин фильтрационное сопротивление зоны местной деформации потока не зависит от положения и формы границ пласта [1].

Так, например, в случае фильтрации к прямолинейной цепочке совершенных скважин (рис. 64-*а*), удаленных от контура питания более, чем на шаг скважин, в большей части области филь-

[1] Под фильтрационным сопротивлением понимается отношение понижения уровней в рассматриваемой зоне к расходу при коэффициенте фильтрации $k=1$ и мощности пласта $T=1$.

трации течение является одноразмерным (линии тока параллельны друг другу) и только вблизи скважины линии тока искривляются, образуя зону местной деформации. Фильтрационное сопротивление этой зоны определяется только размерами скважин и расстоянием их друг от друга.

Зону местной деформации потока можно исключить из рассмотрения, заменив сложное течение к цепочке скважин эквивалентным ему более простым течением к равнодебитной совершенной траншее (рис. 64-*б*). Дополнительное фильтрационное

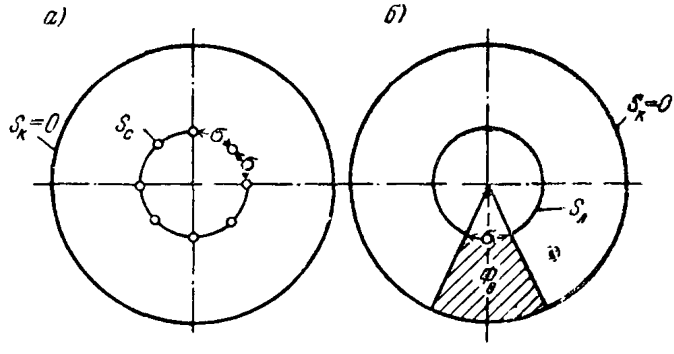


Рис. 65.

сопротивление зоны местной деформации потока[1] учитывается при этом суммарно: на контуре траншеи задается понижение $S_л$ меньшее, чем понижение S_c в соответствующих скважинах ($S_л < S_c$).

В применении к системам скважин метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений [Л. 6] и состоит в замене системы скважин эквивалентной системой совершенных траншей. Эквивалентными системами называются такие системы, которые одинаково расположены по отношению к границам пласта, характеризуются одинаковой величиной и распределением удельного дебита и одинаковыми депрессионными поверхностями уровней потока в некотором удалении от систем, отличаясь только понижениями уровней на контуре систем.

Аналогично рассмотренному выше случаю прямолинейной цепочки скважин (рис. 64) круговая батарея скважин в круговом пласте (рис. 65-*а*) заменяется эквивалентной ей кольцевой траншеей (рис. 65-*б*). При любом сложном очертании водопонизительной установки в плане, как например, на рис. 66, система скважин заменяется эквивалентной системой совершенных траншей, контур которых совпадает с линией, проходящей через центры скважин (линия *ABCD*).

---

[1] Под дополнительным сопротивлением здесь понимается сопротивление, обусловливающее дополнительное понижение уровней потока при фильтрации к скважинам по сравнению с понижением уровней при фильтрации к равнодебитной совершенной траншее.

Если по контуру водопонизительной установки задаются определенные уровни фильтрационного потока, то система эквивалентных траншей представляет собой систему траншей, по контуру которой задаются те же уровни фильтрационного потока. Если же весь водопонизительный контур разделяется на отдельные участки, в пределах каждого из которых задается равномерная расстановка равнодебитных скважин, то вдоль контура

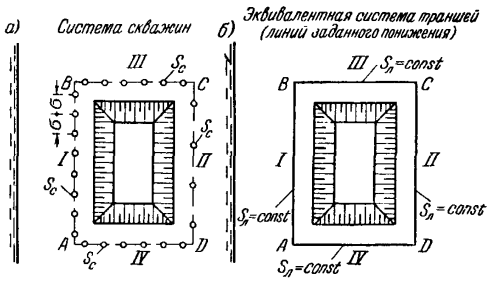


Рис. 66.

каждой эквивалентной траншеи задаются постоянные удельные дебиты.

Согласно методу эквивалентных фильтрационных сопротивлений в случае контурной системы скважин общее фильтрационное сопротивление, приходящееся на одну из скважин, можно представить в виде суммы

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_к. \qquad (П, 1)$$

Величина Φ_0 называется внешним фильтрационным сопротивлением и представляет собой фильтрационное сопротивление при движении грунтовых вод к отрезку эквивалентной совершенной траншеи, длина которого равна шагу скважины (рис. 64, 65). Внешнее сопротивление зависит от геометрии водоносного пласта и расположения скважин по отношению к его границам и друг к другу.

Величина $\Phi_к$ называется общим внутренним сопротивлением контура или дополнительным фильтрационным сопротивлением зоны местной деформации потока. Величина $\Phi_к$ является избытком фильтрационного сопротивления, приходящегося на одну скважину при фильтрации к контурной системе скважин, по сравнению с фильтрационным сопротивлением, приходящимся на участок эквивалентной траншеи, длина которого равна шагу скважин при фильтрации к эквивалентной траншее.

Как в случае установившегося, так и в случае неустановившегося режима фильтрации грунтовых вод, сопротивление $\Phi_к$

вычисляется по единым формулам [Л. 6, Л. 24], которые приводятся ниже.

Если скважины совершенные, то $\Phi_к$ определяется по формуле

$$\Phi_к = \Phi_к' = 0{,}367 \lg \frac{\sigma}{\pi d_с}. \qquad (П, 2)$$

Для определения величины $\Phi'_к$ может быть использована номограмма (рис. 67).

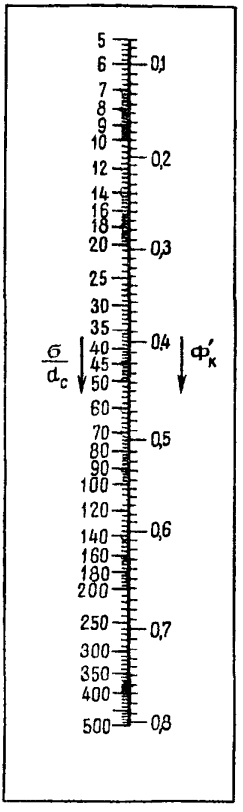


Рис. 67.

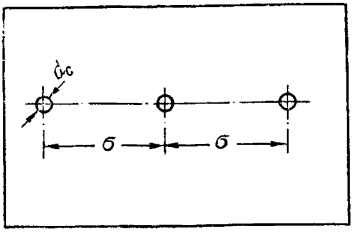


Рис. 68-*а*.

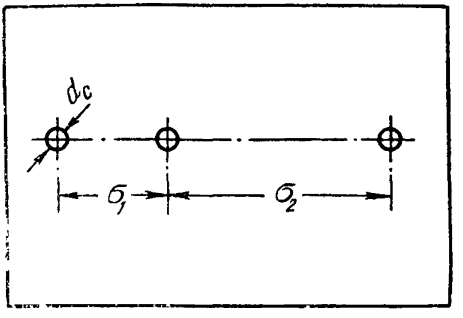


Рис. 68-*б*.

Шаг скважин σ измеряется всегда по линии, проходящей через центры скважин (рис. 64—66). Обычно расстояния рассматриваемой скважины до двух соседних скважин одинаково (рис. 68-*а*). Если же эти расстояния неодинаковы (рис. 68-*б*), то

при пользовании формулой (П, 2) расчетный шаг σ следует определять по формуле

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}. \qquad (П, 3)$$

Если скважины несовершенные, то $\Phi_к$ определяется по формуле

$$\Phi_к = \Phi'_к + \Phi_н + \Delta\Phi_н, \qquad (П, 4)$$

где $\Phi'_к$ вычисляется по формуле (П, 2), а величины $\Phi_н$, $\Delta\Phi_н$ являются фильтрационными сопротивлениями, учитывающими несовершенство скважин, и определяются в соответствии с указаниями § 4.

Как в случае установившегося, так и в случае неустановившегося режимов фильтрации грунтовых вод переход от понижения уровня потока на контуре эквивалентной совершенной траншеи ($S_л$) к понижению уровня потока в самой скважине ($S_с$) осуществляется по формуле

$$S_с = S_л + \frac{Q_с}{kT}\Phi_к, \qquad (П, 5)$$

где $\Phi_к$ определяется по формулам (П, 2) или (П, 4). Для однородного безнапорного потока (см. § 3) формулу (П, 5) удобнее представить в виде

$$h_с = \sqrt{h_л^2 - \frac{2Q_с}{k}\Phi_к}, \qquad (П, 5а)$$

где $h_с$, $h_л$ — соответственно глубины безнапорного потока в самой скважине и в эквивалентной совершенной траншее.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СЕТОК ДВИЖЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА ПРИ ВОДОПОНИЖЕНИИ

Сетка движения образуется системой эквипотенциалей (линий равного напора или равной глубины потока) и нормальных к ним линий тока. Часть области фильтрации, заключенная между двумя соседними линиями тока, носит название ленты тока. Поскольку при расчетах водопонижения фильтрационный поток обычно приводится к планово-плоскому, то ниже будут рассматриваться правила построения сетки движения именно для этого случая.

Для сравнительно несложных условий, особенно при однородном фильтрационном потоке, сетку движения (вернее, ряд расчетных лент тока) следует строить графическим путем.

При построении сетки движения графическим путем следует исходить из условия постоянства приведенного расхода $Q_{гл}$, [Л. 1], которое связывает между собой длину l_i и ширину b_i каждого отсека, ограниченного в ленте тока двумя соседними эквипотенциалями. Из условия

$$Q_{гл} = \text{const} \qquad (\text{П}, 6)$$

следует, что при постоянном шаге эквипотенциалей

$$k_i T_i \frac{b_i}{l_i} = \text{const}. \qquad (\text{П}, 7)$$

Для однородного по вертикали безнапорного потока следует принимать

$$k_i \frac{b_i}{l_i} = \text{const}. \qquad (\text{П}, 7а)$$

Для однородного потока (в пределах расчетной ленты тока)

$$\frac{b_i}{l_i} = \text{const}. \qquad (\text{П}, 7б)$$

Построение каждой расчетной ленты тока целесообразно производить следующим порядком: а) вблизи расчетного участка в первом приближении намечаются эквипотенциали (для целей

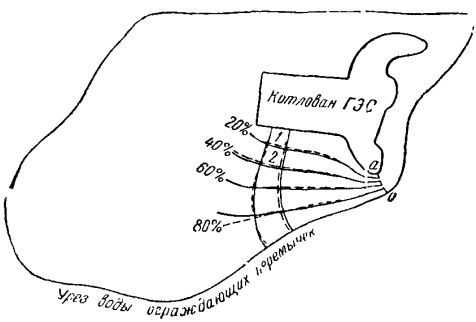


Рис. 69.

водопонижения обычно достаточно проводить четыре эквипотенциали между контурами питания и водопонижения, разбивая тем самым ленту тока на пять отсеков); б) нормально к эквипотенциалям проводятся две линии тока, образующие ленту тока; в) определяются величины приведенного расхода $Q_{гл}$ для каждого отсека, причем в первом приближении редко удается достигнуть достаточного их постоянства; г) учитывая характер изменения величин $Q_{гл}$ в разных отсеках, производится перестройка экви-

потенциалей и, соответственно, линий тока до тех пор, пока не будет достигнуто постоянство $Q_{гл}$ для всех отсеков ленты тока с точностью порядка 5—10%.

Приведем пример построения расчетной ленты тока с одной стороны котлована, расположение которого показано на рис. 69, причем водоносный пласт можно считать однородным. Построение эквипотенциалей начнем с сечения $a-a$, где их распределение можно считать равномерным. Проведем далее эквипотенциали в первом приближении так, как это показано пунктиром на рис. 69, исходя из условия, чтобы эквипотенциали постепенно переходили от нулевой на контуре котлована до стопроцентной — на контуре питания. Далее нормально к эквипотенциалям на интересующем нас участке проводим две линии тока, образующие расчетную ленту тока. Найдем теперь значения $\frac{b_i}{l_i}$ для отдельных отсеков (П, 7б):

№ отсека	1	2	3	4	5
$\frac{b_i}{l_i}$	1,15	0,96	1,04	1,07	0,83

Разброс значений $\frac{b_i}{l_i}$ оказывается значительным, причем в основном отличаются значения $\frac{b_i}{l_i}$ в отсеке *1* (завышено) и в отсеке *5* (занижено). В соответствии с этим поправляем несколько эквипотенциалей, отодвигая от котлована эквипотенциали 20, 40 и 60% и приближая эквипотенциаль 80%, а затем соответственно изменяя и линии тока. Эквипотенциали и линии тока, полученные во втором приближении, показаны на рис. 69 сплошными линиями, а значения для них приведены ниже в таблице:

№ отсека	1	2	3	4	5
$\frac{b_i}{l_i}$	1,0	1,0	1,03	1,03	1,0

Во втором приближении значения $\frac{b_i}{l_i}$ получились уже достаточно постоянными, что позволяет считать построение ленты тока законченным.

Для крупных водопонизительных установок, и особенно в заметно неоднородном фильтрационном потоке для построения эквипотенциалей рекомендуется пользоваться методом ЭГДА [Л. 1, 14, 24].

УРАВНЕНИЯ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ

Неустановившийся характер фильтрации в напорных горизонтах объясняется наличием упругого режима фильтрации, возникающего вследствие обжатия воды и особенно грунта при изменении пластового давления.

Дадим вывод приближенного дифференциального уравнения фильтрации упругой жидкости в сжимаемом однородном пласте, причем для простоты рассмотрим линейную задачу, когда изменение напора предполагается только в одном направлении (по оси x).

Согласно закону Гука для воды можно записать

$$\frac{E_в}{\gamma} d\gamma = dp_в. \qquad (П, 8)$$

В то же время будем считать, что грунт уплотняется по закону копрессии

$$d\varepsilon = a_у dp_{ск}. \qquad (П, 9)$$

В формулах (П, 8) и (П, 9)

$p_в$ — давление в воде;

$p_{ск}$ — давление на скелет грунта;

γ — объемный вес воды;

$E_в$ — модуль упругости воды;

ε — коэффициент пористости;

$a_у$ — коэффициент уплотнения грунта, определяемый по копрессионным данным.

Рассмотрим баланс фильтрационного потока. Вес воды W, находящейся в элементе потока единичной длины будет равен

$$W = \gamma \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} T,$$

а его изменение во времени

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\gamma \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} T\right). \qquad (П, 10)$$

Поскольку величина $\frac{T}{1+\varepsilon}$ представляет собой объем скелета грунта, который считается неизменяемым, то эту величину можно вынести за знак дифференцирования, тогда

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{T}{1+\varepsilon} \frac{\partial (\gamma\varepsilon)}{\partial t}. \qquad (П, 11)$$

Заметив далее, что

$$dp_{в} = \gamma dH \text{ и } dp_{ск} = -\gamma dH \qquad (П, 12)$$

(последнее равенство исходит из того, что при увеличении нейтрального давления воды, соответствующего изменению напора H, происходит такое же уменьшение давления в скелете грунта, и наоборот) и подставив уравнение (П, 8) и (П, 9) в (П, 10), получим уравнение

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\gamma^2 T}{1+\varepsilon}\left(\frac{\varepsilon}{E_{в}} + a_{у}\frac{\partial H}{\partial t}\right). \qquad (П, 13)$$

С другой стороны, по условию неразрывности потока имеем

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\gamma\frac{\partial q}{\partial x}, \qquad (П, 14)$$

где q — расход потока, определяемый, как

$$q = -kT\frac{\partial H}{\partial x}. \qquad (П, 15)$$

Решая совместно уравнения (П, 13), (П, 14), (П, 15), получим уравнение упругого режима для линейной задачи

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \qquad (П, 16)$$

или, переходя к понижениям S,

$$\frac{\partial S}{\partial t} = a\frac{\partial^2 S}{\partial x^2}. \qquad (П, 16а)$$

Аналогичное уравнение получается и для радиальной задачи

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{a}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H}{\partial r}\right). \qquad (П, 17)$$

Входящая в уравнения (П, 16) и (П, 17) величина a называется коэффициентом пьезопроводности [Л. 35], причем

$$a = \frac{k}{\gamma\beta_{упр}}, \qquad (П, 18)$$

где $\beta_{упр}$ — коэффициент упругоемкости пласта

$$\beta_{упр} = \frac{1}{1+\varepsilon}\left(\frac{\varepsilon}{E_{в}} + a_{у}\right). \qquad (П, 18а)$$

Для нескальных пород влиянием сжимаемости воды обычно можно пренебречь, если только вода не содержит заметного

количества газа. В последнем случае, вообще говоря, надо переходить к движению газированной жидкости, исследование которой представляет весьма сложную задачу.

Ориентировочные значения коэффициента пьезопроводности приведены ниже в таблице:

Тип грунта	Суглинок	Супесь	Пески		Песчаники
			Тонкозернистые	Мелкозернистые	
a, $м^2/сут$	100—500	1000	$5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10$	10^5	$10^6 \div 10^7$

При водопонижении в безнапорных горизонтах неустановившаяся фильтрация развивается за счет водоотдачи грунтов при опускании депрессионной поверхности. Для этих условий уравнение неустановившейся планово-плоской фильтрации получено Буссинеском [Л. 1] и в упрощенной (линеаризированной) форме имеет вид

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \beta \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right), \qquad (П, 19)$$

где β — параметр Буссинеска (коэффициент уровнепроводности), определяемый по формуле

$$\beta = \frac{k h_{ср}}{\mu}, \qquad (П, 20)$$

где $h_{ср}$ — средняя мощность фильтрационного потока;

μ — коэффициент водоотдачи грунта.

Определение параметра Буссинеска, как правило, следует производить на основании обработки материалов режимных наблюдений [Л. 4] или, проводя специальные опытные откачки [Л. 7]. Таким путем величина β получается непосредственно из наблюденных данных.

В тех же случаях, когда такого рода материалов не имеется, величину β приближенно можно определять по формуле (П, 20), принимая значение k в соответствии с данными изысканий. Величину $h_{ср}$ для однородного потока следует принимать, как $h_{ср} = \frac{3}{4} h_0$, где h_0 — начальная глубина потока) или $h_{ср} = \frac{h_{макс} + h_{мин}}{2}$ (где $h_{макс}$, $h_{мин}$ — наибольшая и наименьшая глубины в области фильтрации), а для двухслойной среды, когда сверху располагается малопроницаемый слой (рис. 4), можно считать $h_{ср} = T$, причем в формуле (П, 20) k берется для нижнего слоя, а μ для верхнего, в котором располагается депрессионная поверхность.

Приближенное (завышенное) значение μ можно получить по формуле

$$\mu = \gamma_{ск}(W_н - W_м), \qquad (П, 21)$$

где $W_н$ — влажность грунта при полном насыщении;
$W_м$ — максимальная молекулярная влагоемкость;
$\gamma_{ск}$ — объемный вес скелета.

Для песчаного грунта $W_м = 2 - 5\%$, причем первое значение соответствует крупнозернистым пескам, второе — мелкозернистым. Для супесей $W_м = 5 - 7\%$, а для суглинков $W_м = 15—30\%$.

Для сугубо ориентировочных прикидок можно пользоваться, кроме того, следующими значениями μ: для супеси — 0,10—0,20; для суглинка—0,05—0,10.

На процесс водоотдачи существенное влияние оказывает капиллярная зона, наличие которой всегда уменьшает величину водоотдачи. Наилучшим путем определения величины μ, как и параметра Буссинеска β, является обработка данных режимных наблюдений или данных откачек в условиях неустановившегося режима.

Ориентировочные значения параметра Буссинеска β приведены в следующей таблице:

Тип грунта	Супесь	Песок		
		Тонкозернистый	Мелкозернистый	Среднезернистый
β, $м^2/сут$	20—100	50—500	500—2000	1000—3000

ЛИТЕРАТУРА

1. Аравин В. И. и Нумеров С. Н., Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде, Гостехиздат, 1953.
2. Аравин В. И. и Нумеров С. Н., Плановая задача фильтрации, „Известия ВНИИГ", т. 44, 1951.
3. Агаджанов А. М., Гидрогеология и гидравлика подземных вод и нефти, Гостоптехиздат, 1950.
4. Биндеман Н. И., Анохина К. Т., Определение гидрогеологических параметров по данным наблюдений за режимом грунтовых вод при паводках, ВНИИ ВОДГЕО, 1957.
5. Биндеман Н. И., Определение динамических запасов грунтовых вод по водоотдаче песков, ВНИИ ВОДГЕО, 1952.
6. Борисов Ю. П., Определение дебита скважин при совместной работе нескольких рядов скважин, Труды Моск. нефт. ин-та им. Губкина, вып. II, Гостоптехиздат, 1951.
7. Бочевер Ф. М., О постановке опытных откачек в условиях неустановившегося движения для определения гидрогеологических параметров, „Разведка и охрана недр," 1956, № 12.
8. Бочевер Ф. М., Расчет водопонизительных установок в водоносных пластах речных долин, Труды совещания по вопросам водопонижения в гидротехническом строительстве, Госстройиздат, 1959.
9. Бочевер Ф. М., Типизация гидрогеологических условий для целей расчета эксплуатационных запасов подземных вод, „Советская геология", 1958, № 9.
10. Веригин Н. Н., Движение грунтовых вод вблизи водохранилищ, „Гидротехническое строительство", 1952, № 4.
11. Веригин Н. Н., Метод расчета осушения строительных котлованов с помощью несовершенных скважин, Труды совещания по вопросам водопонижения в гидротехническом строительстве, Госстройиздат, 1959.
12. Гаврилко В. М., Абрамов С. К., Фильтры буровых скважин, Госстройиздат, 1954.
13. Гиринский Н. К., Некоторые вопросы динамики подземных вод, Сборник „Гидрогеология и инженерная геология", 1947, № 9.
14. Дружинин Н. И., Метод электродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации, Госэнергоиздат, 1956.
15. Жуковский И. Е., Теоретическое исследование о движении подпочвенных вод, Избранные сочинения, т. 1, Гостехиздат, 1948.
16. Каменский Г. Н., Основы динамики подземных вод, Госиздат, 1943.
17. Лыков А. В., Теория теплопроводности, Гостехиздат, 1952.
18. Михайлов Г. К., О фильтрации в трапецеидальных плотинах на горизонтальном водоупоре, „Гидротехника и мелиорация", 1952, № 1.
19. Мятиев А. И., Действие колодца в напорном бассейне подземных вод, „Известия Туркм. фил. АН СССР", 1946, № 3.
20. Маскат М., Течение однородных жидкостей и газов в пористой среде (пер. с англ.), Гостоптехиздат, 1949.
21. Маменко Г. К., Гидрогеологические условия котлованов Сталинградского гидроузла, Труды совещания по вопросам водопонижения в гидротехническом строительстве, Госстройиздат, 1959.

22. Нумеров С. Н., О неустановившейся фильтрации в полосообразном пласте к прямолинейной цепочке совершенных скважин, Известия АН СССР, ОТН, 1958, № 1.
23. Павловская Л. Н., Экспериментальное исследование дополнительного фильтрационного сопротивления, обусловленного несовершенством скважины по степени вскрытия пласта в случае прямолинейной цепочки безнапорных скважин, „Известия ВНИИГ", т. 62, 1959.
24. Павловская Л. Н., Фильтрационный расчет водопонижения в строительных котлованах гидротехнических сооружений, „Известия ВНИИГ", т. 64, 1960.
25. Павловская Л. Н., Фильтрационный расчет водопонижения для первоначальной откачки при устройстве строительных котлованов гидротехнических сооружений, Научно-техническая конференция молодых специалистов (Сборник докладов), Госэнергоиздат, 1959.
26. Романов А. В., Приток воды к водосборам подземных вод и дренам, Сборник статей „Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений", Госстройиздат, 1952.
27. Форхгеймер Ф., Гидравлика, ОНТИ, 1935.
28. Чарный И. А., „Инженерный сборник", т. XXIII, ОТН, АН СССР, 1956.
29. Чарный И. А., Основы подземной гидравлики, Гостоптехиздат, 1956.
30. Шестаков В. М., Расчет водопонизительных установок сложных контуров в плане, Сборник „Опыт искусственного понижения уровня грунтовых вод на строительстве гидроэлектростанций", Госэнергоиздат, 1956.
31. Шестаков В. М., Вопросы расчета водопонизительных установок сложных контуров в плане, Труды института ВОДГЕО, Госстройиздат, 1958.
32. Шестаков В. М. и Кузнецова Н. А., Фильтрационная устойчивость песчаных откосов, Труды института ВОДГЕО, Госстройиздат, 1958.
33. Шестаков В. М., Вопросы расчета крупных водопонизительных установок, Труды совещания по вопросам водопонижения в гидротехническом строительстве, Госстройиздат, 1959.
34. Шестаков В. М., Определение эффективности водопонижения в покровном слое, „Основания, фундаменты и механика грунтов", 1961, № 2.
35. Щелкачев В. Н., Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме, Гостоптехиздат, 1959.
36. Шпильрейн Я. Н., Таблицы специальных функций, ОНТИ, 1934.
37. Theis C. V., The relation between the lowering of the piezometric surface on the rate and duration of discharge of well using ground water storage, Transaction Amer. Geophisical Union, 1935.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие 5

ГЛАВА I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ ВОДОПОНИЖЕНИЯ

§ 1. Расчетные случаи водопонижения в строительных котлованах гидротехнических сооружений и задачи фильтрационных расчетов водопонижения 9
§ 2. Типизация строительных котлованов гидротехнических сооружений в зависимости от гидрогеологических условий 12
§ 3. Учет фильтрационной неоднородности водоносного пласта и несовершенства его границ 19
§ 4. Учет несовершенства скважин водопонизительной установки 23
§ 5. Порядок фильтрационных расчетов водопонизительных установок 28

ГЛАВА II. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ВОДОПОНИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ

А. Расчет для типовых условий

§ 6. Определение общего притока к водопонизительным установкам . . 32
§ 7. Расчет взаимодействующих скважин 36

Б. Расчет водопонизительных установок в сложных условиях питания

§ 8. Оценка притока к водопонизительной установке 46
§ 9. Методика расчета систем скважин 47
§ 10. Расчет водопонижения в условиях линейных в плане потоков . . 49
§ 11. Расчет водопонижения в двухслойной среде 58

ГЛАВА III. ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ВОДОПОНИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ ОТКАЧКИ

А. Расчет водопонизительных установок в типовых условиях

§ 12. Оценка общего и дополнительного притоков к водопонизительным установкам 61
§ 13. Детальный расчет взаимодействующих скважин 64

Б. Расчет водопонизительных установок в сложных условиях

§ 14. Общие положения методики расчета водопонизительных установок в сложных условиях питания 74
§ 15. Расчет водопонизительных установок для котлованов, разрабатываемых насухо 75
§ 16. Расчет водопонизительных установок несовершенных котлованов, разрабатываемых способом гидромеханизации 78
§ 17. Определение времени разгрузки напорных горизонтов 86

Стр.

ГЛАВА IV. ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ВОДОПОНИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ПРОЕКТНЫХ УРОВНЕЙ В ПАВОДОК

§ 18. Общие положения 93
§ 19. Расчет водопонизительных установок в типовых условиях 96
§ 20. Расчет водопонизительных установок в сложных условиях 103

Приложение 1. Метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений . 110
Приложение 2. Методика построения сеток движения фильтрационного потока при водопонижении 114
Приложение 3. Уравнения неустановившейся фильтрации 117

Литература 121

Замеченные опечатки

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
6	18	12, 16	12 — 16
19	сноска	§ 19	§ 9
41	формула (II, 11)	$\Phi_{к}^{(i)}$	$\Phi_{кi}$
77	рис. 40	$F_4(\alpha)$	$F_4(\sigma, \lambda)$

gost.e-ecolog.ru