

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГИДРОГЕОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ (ВСЕГИНГЕО)

М. Е. АЛЬТОВСКИЙ

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО
ПО РАСЧЕТУ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
АРТЕЗИАНСКИХ И ГРУНТОВЫХ
ВОДОЗАБОРОВ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МИНИСТЕРСТВА ГЕОЛОГИИ СССР
МОСКВА 1947 ЛЕНИНГРАД

Оглавление

	Стр.
Предисловие	3
Введение	5
Часть первая	
Г л а в а I. Общая характеристика взаимодействия буровых скважин	
1. Основные определения	9
2. Особенности взаимодействия скважин в зависимости от различных факторов	12
Г л а в а II. Краткий обзор теорий взаимодействующих скважин	
1. Теория Форхгеймера	23
2. Теория Слихтера и Лейбензона	27
3. Теория Мэската и Щелкачева	31
4. Гидравлический метод Альтовского	39
Часть вторая	
Г л а в а III. Расчет взаимодействующих артезианских скважин	
1. Общие положения	64
2. Малые группы скважин	66
3. Линейно расположенные группы скважин	70
4. Метод Кирнлейса	73
5. Скважины, расположенные по сеткам	75
6. Метод Альтовского	76
7. Особые случаи расчета взаимодействующих артезианских скважин	81
8. Некоторые дополнительные условия применения формул	82
9. Примеры расчета взаимодействующих скважин	83
Г л а в а IV. Расчет взаимодействующих грунтовых колодцев	
1. Основные формулы	101
2. Расчет водопонизительных установок по методу Форгеймера	105
3. Расчет подобных в плане групп скважин по Кирнлейсу	108
4. Условия применения формул для расчета взаимодействующих грунтовых колодцев	109
5. Примеры расчета взаимодействующих грунтовых колодцев	110
Л и т е р а т у р а	116
Приложение — Рекомендуемые нормальные данные для производства опытных откачек	
Типы опытных узлов	117
Средняя продолжительность откачки	121
Число, величина и порядок понижений	123

Редактор Г. В. Богомолов

Сдано в набор 31/1-1947 г.

Формат бумаги 60x92^{1/16}

Печ. л. 7^{1/4}

Тех. редактор А. С. Циклова

Подписано к печати 18/VIII-1947 г.

Заказ 94

М 05636

Цена 7 руб. 50 коп.

Тираж 3000

Учетн. нэд. л. 8,9

Типография Картфабрики Госгеолиздата

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учитывая большое значение расчетов взаимодействующих артезианских и грунтовых скважин, широко применяемых при эксплоатации подземных вод в целях водоснабжения, при искусственном понижении уровня подземных вод для промышленного строительства и в горном деле, Институтом ВСЕГИНГЕО по решению Министерства геологии СССР составлено настоящее „Методическое руководство по расчету взаимодействующих артезианских и грунтовых скважин“.

Так как без достаточно основательного знакомства с теорией взаимодействующих скважин нельзя правильно применять довольно многочисленные методы их расчета, Институт ВСЕГИНГЕО считает необходимым инструктивной части данной работы предпослать общий обзор явления взаимодействия скважин и краткий обзор существующих теорий для их расчета. Соответственно этому настоящее методическое руководство состоит из двух частей—вводной и инструктивной. Точность расчетов взаимодействующих скважин в значительной степени зависит от достоверности и надежности данных, получаемых в процессе производства опытных откачек. Поэтому институт находит весьма полезным дать в виде приложения к настоящей работе краткие методические указания и некоторые нормативные данные по производству опытных откачек, имеющие своей целью исключить грубые ошибки при полевых исследованиях.

В данном руководстве впервые в полном объеме опубликовывается гидравлический метод Альтовского по расчету взаимодействующих скважин.

Учитывая, однако, недостаточность полевых экспериментальных данных, подтверждающих возможность применения гидравлического метода для криволинейных зависимостей дебита от понижения, Институт ВСЕГИНГЕО рекомендует применять предлагаемый М. Е. Альтовским метод, как дающий достаточно на-

дежные результаты для случая прямолинейной зависимости. Что же касается зависимостей параболических и степенных, то в этом случае расчеты следует производить по гидравлическому методу в экспериментальном порядке.

Ряд незатронутых в настоящем руководстве вопросов, например, о взаимовлиянии нескольких водоносных слоев, о расчетах, основанных на теории неустановившегося движения и др., в настоящее время разрабатываемых Институтом ВСЕГИНГЕО, будет опубликован по мере окончания их разработки и экспериментальной проверки.

ВВЕДЕНИЕ

Первые соображения относительно расчета взаимодействующих скважин были высказаны еще в 1863 г. Дюпюи (21), который в общих чертах рассмотрел взаимодействие двух и трех скважин, пробуренных до очень узкого по ширине артезианского потока. Приведенные им положения по вопросу о взаимодействии буровых скважин в настоящее время имеют лишь исторический интерес. Поэтому следует считать, что впервые решение этой задачи было разработано почти одновременно (1898—1899 гг.) и независимо друг от друга Ф. Форхгеймером (19, 22) для артезианских скважин и грунтовых колодцев и Ч. Слихтером (25) для артезианских скважин. Оба указанные автора, пользуясь методом „источников и стоков“, дают приближенное, недостаточно строго обоснованное с гидромеханической точки зрения, решение задачи о взаимодействующих скважинах. В дальнейшем метод Ф. Форхгеймера был дополнен и несколько уточнен, главным образом работами В. Кириллеса в 1911 г. (10), отчасти И. Шульце в 1924 г. (24), В. Зихардта в 1928 г. (10) и И. П. Кусакина в 1930 г. (12).

Метод Форхгеймера весьма широко применяется при расчете и проектировании различного рода водопонизительных установок и дренажных сооружений. Можно сказать, что его формулы и до настоящего времени являются единственными, на основании которых рассчитываются и проектируются указанные выше сооружения.

В 1912 г. А. Краснопольским (11) и Кейльгаком в книге „Подземные воды“ (9) были высказаны принципиально неверные замечания относительно взаимодействующих скважин. Первый полагал, что дебит одной из двух взаимодействующих скважин будет уменьшаться соответственно увеличению площади, заключенной между двумя пересекающимися окружностями радиуса, равного радиусу влияния. Второй по поводу взаимодействия скважин пишет: „Если недалеко от скважины провести другую, то сумма притоков воды из обеих будет равна притоку из такой скважины, площадь поперечного сечения которой равняется сумме площадей сечения двух первых“. Таким образом К. Кейльгак абсолютно необоснованно полагает, что взаимодействие между скважинами определяется только соотношениями площадей фильтрующих поверхностей.

Метод и формулы Ч. Слихтера в дальнейшем были изменены и дополнены Л. С. Лейбензоном в опубликованной им в 1934 г. работе „Нефтепромысловая механика“, ч. II (13). В 1937 г. вышла в свет работа М. Мэската (M. Muskat) (23), посвященная теории течения однородной жидкости через пористые среды. Автор, пользуясь теорией комплексных переменных, в главе о взаимодействующих артезианских скважинах дал ряд весьма интересных в гидромеханическом отношении решений для различного числа взаимодействующих скважин, различным образом расположенных друг к другу и к контуру питания.

В. Н. Щелкачев в 1939 г. (20) опубликовал специальную работу по интерференции (взаимодействию) скважин, в которой он, пользуясь методом отображения источников и стоков (конформные преобразования), дал достаточно строгую с гидромеханической точки зрения теорию взаимодействия скважин. Им рассмотрено и дано решение для очень многих случаев различного числа и различным образом расположенных по отношению друг к другу и к контуру питания артезианских скважин.

Некоторые основные положения гидравлического метода решения задачи о взаимодействующих скважинах впервые были указаны автором настоящей работы в 1931 г. Почти аналогичные положения, но нерешенные до конца, были выдвинуты А. А. Макавеевым и опубликованы им в 1932 г. (14). В основном они сводились к следующему: дебит взаимодействующей скважины равен дебиту невзаимодействующей минус удельный дебит, умноженный на уменьшенную за счет снижения дебита срезку уровня воды. В дальнейшем этот метод постепенно уточнялся и дополнялся в процессе применения его при производстве гидро-геологических исследований для магнитогорских, рубежанских и минских водозаборов. В период 1934—1937 гг. автором было опубликовано несколько статей, освещавших основные принципы и примеры расчета взаимодействующих скважин (2, 3 и 4). В этих статьях в качестве рабочей гипотезы были выдвинуты следующие три основные положения: а) при влиянии скважин функция, выражающая зависимость дебита и от понижения, остается без изменения; б) суммарная срезка уровня (т. е. суммарное понижение) для артезианских скважин равна алгебраической сумме срезок от отдельных взаимодействующих скважин при условии равенства их дебитов и в) степень взаимодействия скважин вполне характеризуется коэффициентом подсасывания (коэффициент снижения дебита), являющимся для прямолинейных зависимостей дебита от понижения величиной постоянной и уменьшающейся для параболических зависимостей.

В 1938 г. А. М. Агаджанов, по сути дела базируясь на трех указанных выше основных положениях, опубликовал статью (1), в которой, используя материалы по Баку-Шолларским водозаборам, вывел формулы для вычисления уменьшенной срезки уровня воды и для определения дебита двух взаимодействующих скважин при условии прямолинейной зависимости между дебитом и

нижениями как опытных, так и в наблюдательных скважинах. В той же статье А. М. Агаджанов опубликовал метод расчета трех взаимодействующих скважин, который, вообще говоря, можно распространить и на большее число их, но в этом случае техника расчета становится исключительно сложной. В 1939 г. опубликована статья Е. Ф. Тамма (18), в которой автор приходит к уже известным и ранее опубликованным положениям, но доказывает их несколько иным путем и дает решение задачи о двух и трех взаимодействующих скважинах. В этой статье имеется очень ценное указание на то, что вычисление суммарного понижения для какой-либо точки, удаленной на то или другое расстояние от взаимодействующих скважин, должно производиться различно в зависимости от закона движения подземных вод. В конце того же 1939 г. была опубликована статья Н. Н. Веригина (6), в которой предлагаются недостаточно обоснованные формулы для расчета взаимодействующих скважин. Наконец, в 1940 г. вышла в свет „Временная инструкция по расчету взаимодействующих артезианских скважин“, составленная автором настоящей работы (7). В этой инструкции по материалам темы, проработанной в Институте ВОДГЕО в 1938 г., в сжатой форме даны основные формулы и достаточно простая и удобная для практики техника расчета взаимодействующих артезианских скважин.

Расчет взаимодействующих скважин представляет очень сложную задачу, при современном состоянии наших знаний в очень многих случаях не поддающуюся сколько-нибудь точному решению. Полностью разрешить проблему взаимодействующих скважин—значит дать для любого случая формулы и методы определения:

а) суммарного дебита и дебита каждой взаимодействующей скважины в отдельности, при условии создания в них разных понижений;

б) понижений, получающихся при одновременной откачке воды из всех взаимодействующих скважин как в их центре, так и на их внешнем контуре (т. е. у внешней стенки обсадных труб), а также и в любой точке водоносного горизонта, удаленной в том или ином направлении на различное расстояние от системы взаимодействующих скважин:

в) скорости течения воды в любой точке водоносного горизонта, питающего данную систему взаимодействующих скважин,

г) и наконец,—дать метод построения гидродинамических сеток движения.

Эти решения, как было сказано выше, нужно найти для любого случая. Следовательно, при решении задач о взаимодействующих скважинах необходимо учитывать:

а) различные гидрогеологические условия т. е., главным образом, разные законы движения подземных вод, различную степень водопроницаемости горных пород (однородные и неоднородные условия), различные соотношения между суммарным де-

битом взаимодействующих скважин и расходом водоносного горизонта (установившееся и неустановившееся движение), различную глубину вскрытия водоносных горизонтов, наклон их и наличие в жидкости нерастворенных газов;

б) физические свойства жидкости, главным образом удельный вес и вязкость;

в) различные геометрические соотношения (расстояние и расположение), получающиеся при применении разного числа взаимодействующих скважин, находящихся на различных расстояниях между собой и различным образом расположенных как по отношению друг к другу, так и по отношению к различной форме питающих и водонепроницаемых контуров, внутри или вблизи которых находится данная система взаимодействующих скважин,

и г) различного рода условия, возникающие при применении фильтров разного типа и разных диаметров.

Короче говоря, для полного решения задачи о взаимодействующих скважинах необходимо заново разработать для каждого конкретного случая всю теорию притока воды к вертикальным капитальным сооружениям. Однако в настоящее время разработаны только частные решения этой проблемы, основанные на различных методах и ограниченные в отношении их применения на практике разными условиями, вытекающими или из основных предпосылок, или из различного рода допущений, сделанных в процессе вывода основных формул.

Разработка методов решения задачи о взаимодействующих скважинах имеет огромное народнохозяйственное значение, так как почти во всех случаях эксплоатации жидких полезных ископаемых, при борьбе с подземными водами, при разработке обводненных месторождений, при дренаже и искусственном понижении уровня подземных вод, при гражданском промышленном и гидротехническом строительстве неизбежно приходится применять различные системы взаимодействующих скважин.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ГЛАВА I

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БУРОВЫХ СКВАЖИН

1. Основные определения

Как известно, влияние одной скважины на другую выражается в том, что при одновременной откачке воды из взаимодействующих скважин их дебиты становятся меньшими по сравнению с теми, которые имели место при откачке воды из каждой скважины в отдельности. При этом предполагается, что величина создаваемого в скважинах понижения в обоих случаях одинакова. Кроме того, взаимодействие скважин проявляется и в том, что под влиянием откачки воды из какой-либо одной скважины статический уровень ее в соседних понижается на некоторую величину, в дальнейшем называемую срезкой уровня воды.

Некоторые исследователи (А. Тим, Е. Принц), иллюстрируя работу взаимодействующих скважин, пользуются понятием ширины полосы или района их питания. Эти исследователи полагают, что влияние одной скважины на другую прежде всего сказывается в том, что при совместной эксплоатации происходит пересечение их полос питания, в результате чего уменьшается дебит каждой взаимодействующей скважины.

Если за основной результат взаимодействия принять понижение статического уровня воды в соседних скважинах, то взаимодействующими скважинами следует называть те, которые расположены на расстоянии меньшем одного, а по некоторым формулам — двух радиусов влияния. Но это определение будет недостаточно точным и практически неясным, так как радиус влияния является величиной переменной, зависящей от дебита скважин.

Кроме того, в настоящее время имеются два различных толкования понятия о радиусе влияния скважин. Большинство исследователей гидрогеологов и гидравликов (Принц, Кейльгак, Майнцнер, Слихтер, Мэскат и др.) дают несколько различные определения понятия о радиусе влияния; они все же под этой величиной понимают некоторое расстояние от взаимодействующих сква-

жин, в большинстве случаев сравнительно незначительное по сравнению с размерами всего водоносного слоя и зависящее от водопроницаемости водоносных пород и дебита скважин.

Таким образом эти исследователи допускают возможность одновременного существования в одном и том же водоносном слое двух и более невзаимодействующих скважин.

В противоположность этой точке зрения В. Н. Щелкачев, основываясь на теории поля, считает такое понятие о радиусе влияния неясным и нелогичным. Он полагает, что каждая скважина распространяет свое влияние до естественных границ областей питания водоносного слоя. Поэтому, по В. Н. Щелкачеву, в одном и том же водоносном слое может существовать только одна невзаимодействующая скважина; две или более скважин, пробуренных до одного и того же водоносного слоя, непременно будут взаимодействующими. Таким образом, согласно В. Н. Щелкачеву, под радиусом влияния следует понимать расстояние от скважин до границ области питания.

Эти два противоположных толкования понятия о радиусе влияния следует иметь в виду при изучении вопроса о взаимодействии скважин.

Положить в основу определения взаимодействующих скважин пересечение полос или районов их питания, т. е. под взаимодействующими скважинами понимать расположенные на расстоянии меньшем двух радиусов питания, также будет не совсем удачно. Дело в том, что и в скважинах, удаленных друг от друга на расстояние, большее двух радиусов питания, но меньшее двух радиусов влияния, может иметь место снижение статического уровня воды, т. е. снижение напора, а следовательно, и некоторое уменьшение дебита, так как величину понижения мы неизбежно отсчитываем от прежнего статического уровня воды. Радиус питания, так же как и радиус влияния, является величиной переменной и практически трудно определимой; поэтому, взяв его за основу, мы получим недостаточно определенное понятие о взаимодействующих скважинах. Лучше всего, нам кажется, результат взаимодействия буровых скважин выражается уменьшением их дебита. Поэтому в дальнейшем под взаимодействующими скважинами будем понимать такие, у которых при одновременной откачке дебиты становятся меньшими по сравнению с теми, которые имели каждый из них при одной и той же величине понижения. Это определение взаимодействующих скважин не связано с переменными величинами и недостаточно ясными понятиями о радиусах влияния и питания и указывает на основной, конечный результат взаимного влияния буровых скважин. Согласно этому определению две скважины, удаленные друг от друга на одно и то же постоянное расстояние, могут быть как взаимодействующими, так и невзаимодействующими в зависимости от того, уменьшается ли их дебит при создании в них различной величины понижения или нет. По нашему мнению, это вполне соответствует тому, что наблюдается в действительности,

так как при небольших по величине понижениях скважины могут и не влиять друг на друга. Однако влияние между ними все же будет обнаружено при создании в них больших по величине понижений.

Степень или интенсивность взаимного влияния скважин количественно можно выразить безразмерными коэффициентами, представляющими или отношение дебита взаимодействующей скважины к дебиту невзаимодействующей, или отношение разности этих дебитов к дебиту скважины невзаимодействующей. Отношение дебита скважины взаимодействующей Q' к дебиту скважины невзаимодействующей Q будем называть в дальнейшем коэффициентом влияния β :

$$\beta = \frac{Q'}{Q}. \quad (1)$$

Отношение разности этих дебитов к дебиту невзаимодействующей скважины назовем коэффициентом снижения дебита α , так как этот коэффициент показывает в долях единицы или в процентах количество теряемой воды скважинами в результате их взаимного влияния:

$$\alpha = \frac{Q - Q'}{Q}. \quad (2)$$

Еще раз следует подчеркнуть, что сравнивать дебиты скважин взаимодействующих и невзаимодействующих нужно обязательно для одной и той же величины понижения.

Из формул (1) и (2) следует, что коэффициент снижения дебита равен единице минус коэффициент влияния:

$$\alpha = 1 - \beta, \quad (3)$$

и, наоборот, коэффициент влияния равен единице минус коэффициент снижения дебита:

$$\beta = 1 - \alpha. \quad (4)$$

Зная значение одного коэффициента, мы можем, пользуясь двумя последними формулами, легко находить другой. Из формул (1) и (2) получаются и две другие основные формулы гидравлического метода подсчета взаимодействующих скважин, а именно: дебит взаимодействующей скважины равен дебиту скважины невзаимодействующей, умноженному на коэффициент влияния или на разность между единицей и коэффициентом снижения дебита¹.

$$Q' = \beta Q, \text{ или } Q' = (1 - \alpha) Q. \quad (5)$$

Из формулы (5) вытекает чрезвычайно важное положение, что расчет взаимодействующих скважин можно свести к расчету невзаимодействующих, если предварительно тем или иным путем определить или коэффициент влияния или коэффициент снижения дебита.

¹ В одной из ранее опубликованных статей (3) этот коэффициент автором настоящей работы был назван коэффициентом подсасывания.

Взаимодействие может происходить, конечно, не только между двумя, но и между многими скважинами, находящимися на различных между собой расстояниях и различным образом расположеными по отношению как друг к другу, так и к контуру или к области их питания. В этом случае мы будем говорить о группе или о системе взаимодействующих скважин, а результат их взаимного влияния выражать через суммарный коэффициент либо влияния $\Sigma\beta$, либо снижения дебита $\Sigma\alpha$.

Если скважины будут удалены одна от другой на расстояние, при котором между ними не будет взаимодействия, то, очевидно, суммарный коэффициент влияния будет равняться единице, а суммарный коэффициент снижения дебита — нулю. Если же две скважины расположить рядом, то их суммарный дебит приближенно будет равен дебиту одной невзаимодействующей скважины, причем каждая из них в отдельности будет давать только половину этого количества воды. При трех рядом расположенных скважинах их дебит будет равен приближенно одной трети дебита невзаимодействующей скважины и т. д. Следовательно, значение суммарного коэффициента влияния может колебаться в зависимости от расстояния между скважинами от 1 до $\frac{1}{n}$, где n — число взаимодействующих скважин:

$$\frac{1}{n} < \Sigma\beta = 1. \quad (6)$$

Рассуждая аналогичным образом, найдем, что суммарный коэффициент снижения дебита будет больше нуля и меньше $1 - \frac{1}{n}$:

$$1 - \frac{1}{n} > \Sigma\alpha \geqslant 0. \quad (7)$$

2. Особенности взаимодействия скважин в зависимости от различных факторов

Степень и характер взаимодействия буровых скважин зависит от целого ряда факторов. Из них главное значение имеют следующие: условия питания водоносного слоя, или, точнее, установившееся или неустановившееся движение; тип подземного потока (артезианские или грунтовые воды); законы движения подземных вод и вид функций, выражающих зависимость дебита от понижения; число скважин и расстояние между ними; водопроницаемость горных пород и ее изменения в пространстве и, наконец, геометрическое расположение взаимодействующих скважин в плане (малые группы скважин, линейное, по сеткам и т. д.).

Меньшее значение по сравнению с предыдущими факторами имеют: расстояние скважин от контуров питания и водонепроницаемых контуров и форма последних (круговая или прямолинейная), наклон водоносных слоев, направление подземного потока, диаметр и тип фильтра и, наконец, тип колодца (несовершенные и совершенные колодцы).

Зависимость интенсивности взаимодействия от некоторых перечисленных выше факторов в настоящее время еще совершенно не изучена. К такого рода факторам относятся: а) имеющие существенное значение законы движения подземных вод, установившееся и неустановившееся движение и водопроницаемость пород (однородные и неоднородные) и б) имеющие второстепенное значение—направление подземного потока и тип фильтра.

В литературе также совершенно не освещен вопрос о взаимодействии несовершенных скважин, т. е. скважин, не доведенных до водоупора.

В настоящей работе, ввиду ее краткости, невозможно, конечно, осветить сколько-нибудь подробно условия взаимодействия скважин в зависимости от всех перечисленных выше факторов. Поэтому здесь будет изложено только самое основное, без чего невозможны правильное использование существующих методов расчета взаимодействующих скважин и критическая оценка полученных результативных данных.

Весьма существенное влияние на работу взаимодействующих скважин оказывают условия питания водоносных слоев или, лучше сказать, наличие установившегося или неустановившегося движения подземных вод.

В гидрогеологии различают бассейны или резервуары и потоки подземных вод. При откачке воды из подземного резервуара, т. е. из водоносного слоя при отсутствии в нем естественной скорости течения воды, что в очень большом числе случаев связано с почти полным отсутствием естественного питания, вокруг скважин образуется непрерывно увеличивающаяся во времени круглая воронка депрессии, границы которой совпадают с границами района ее влияния и питания. В этом случае по всем направлениям радиус влияния равен радиусу питания, и обе эти величины являются функцией времени, т. е. откачка воды будет производиться в условиях неустановившегося движения.

Если откачка производится из резервуара подземных вод, имеющего очень большое распространение и значительную мощность, или из потока подземных вод, имеющего незначительную скорость течения, а следовательно, и очень небольшой пьезометрический уклон и при условии, что количество откачиваемой воды меньше или очень незначительно превосходит естественный расход подземного потока, то приближенно, с точностью, достаточной для практики, можно считать движение воды установившимся и полагать, что здесь также образуется круглая воронка депрессии и что границы районов питания и влияния совпадают. В этом случае радиусы питания и влияния приближенно также будут равны, и величина их будет одинакова по всем линиям, идущим в разные направления от скважины или группы скважин.

При откачке воды из потока подземных вод, в котором количество откачиваемой воды меньше его естественного расхода, около скважин образуется асимметричная, вытянутая вдоль направ-

ления потока воронка депрессии, границы которой совпадают с границами района влияния, а район питания меньше района влияния. При этом в начале откачки движение воды будет неустановившимся, но постепенно оно перейдет в установленное, о чем будет свидетельствовать стабилизация динамических уровней воды в скважинах.

Если в первом случае, и отчасти во втором, провести линию вдоль границ районов питания или влияния, то получим замкнутый круговой контур, вдоль которого происходит питание данной группы скважин. Подобного рода контуры в дальнейшем мы будем называть контурами питания.

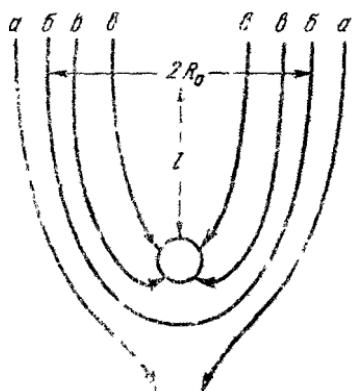


Рис. 1.

Существенно иное положение получается в отношении контура питания при откачке воды из потока подземных вод. Как было сказано выше, в этом случае образуется асимметричная воронка депрессии. Линия, проведенная по границе района питания, не будет соответствовать контуру питания, так как питание скважины с боковых и с низовой по отношению к направлению течения сторон проходит не будет. Все питание идет по линии простирания потока, равной двум радиусам питания. Таким образом, в данном случае мы будем иметь незамкнутый, прямолинейный контур питания длиной $2R_0$ и удаленный от скважин на некоторое расстояние l (рис. 1).

При откачке воды из резервуара подземных вод или в условиях, когда суммарный дебит скважин превышает естественный расход подземного потока, т. е. когда имеется неустановившееся движение, контур питания с течением времени будет постепенно удаляться от скважины и дойдет до границы естественной области питания водоносного слоя. В этом случае контур питания сольется с внутренней границей области питания водоносного слоя и примет ее форму. В природных условиях при всестороннем поступлении воды в водоносный слой контур питания большей частью будет иметь вытянутую в плане форму, в геометрическом отношении приближающуюся к эллипсам, к кассиноидам и другим подобным им формам. При одностороннем поступлении воды в водоносный слой контур питания может быть приближенно прямой линией или будет совпадать с какой-то кривой. Во всех случаях при условии равенства между суммарным дебитом скважин и количеством поступающей в водоносный слой воды в конце концов получится установленное движение, характеризуемое неизменяемостью во времени количества откачиваемой воды и

постоянством напоров как в скважинах, так и в области питания водоносного слоя. Если же суммарный дебит будет превышать естественный приток воды в водоносный слой, то при поддержании в скважинах постоянного динамического уровня воды их дебит и напоры в области питания будут постепенно уменьшаться, что в конечном счете приведет к осушению или, как говорят, к истощению водоносного слоя.

В зависимости от природных условий данного района контур питания может дойти в одном или нескольких направлениях до каких-либо водонепроницаемых слоев. В этом случае эксплуатируемые скважины могут быть окружены как геометрически замкнутым, так и незамкнутыми контурами, часть которых будет состоять из контуров питания, а часть из водонепроницаемых контуров.

Из сказанного следует, что во всех случаях, когда контур питания доходит до геологических границ распространения водоносного слоя, до водонепроницаемых слоев, до питающих его рек и других открытых водоемов, то нет уже каких-либо оснований говорить о радиусах влияния и питания; здесь следует эти величины просто заменять расстояниями до водонепроницаемых контуров и контуров питания.

Таким образом мы имеем две группы задач, что будет соответствовать двум различным толкованиям понятия о радиусе влияний, а именно, когда влияние скважин доходит и когда не доходит до границ естественных областей питания или до водонепроницаемых контуров. В первом случае следует различать только форму этих контуров и вместо радиуса влияния принимать расстояние от них до буровых скважин, а во втором что

а) при откачке из резервуаров подземных вод, имеющих весьма большое распространение, и условно при откачке из потоков с очень малой скоростью образуются контуры питания круговой формы, расстояние от которых до скважин равно одинаковым по величине радиусам питания и влияния;

б) при откачке из потоков подземных вод и при условии, что их естественный расход превосходит дебит буровых скважин, получаются прямолинейные контуры питания, длина которых равна двум радиусам питания;

в) если дебит скважин будет больше естественного расхода подземного потока, то мы будем иметь промежуточный случай, когда получившийся прямолинейный контур питания с течением времени сольется с естественными границами водоносного слоя и примет их форму; этот случай будет составлять одну из задач первой группы.

Таким образом при расчете взаимодействующих скважин необходимо строго различать указанные выше две группы задач. Соответственно отнесению их к той или иной группе величина радиуса влияния в излагаемых ниже теориях может рассматриваться с двух точек зрения: во-первых, как расстояние от скважин до естественных границ области питания водоносных слоев, и во-

вторых, как расстояние до контура, ограничивающего сферу влияния, действия или „засасывания“ группы взаимодействующих скважин.

Перейдем к рассмотрению интенсивности взаимодействия в зависимости от числа и расстояния между скважинами.

Формулы (6) и (7), приведенные в предыдущем разделе, характеризуют изменения интенсивности взаимодействия, определяемой суммарными коэффициентами влияния и снижения дебита в зависимости от расстояния между скважинами и числом их. Например, для десяти скважин при максимально близком их расположении коэффициент влияния имеет предельно наименьшее численное значение приближения, равное 0,1. Это означает, что каждая из десяти взаимодействующих скважин будет иметь дебит, равный только 0,1 дебита одиночного колодца.

Однако пределы изменения коэффициента влияния до $\frac{1}{n}$ и коэффициента снижения до $1 - \frac{1}{n}$, где n — число скважин, являются чисто математическими и могли бы иметь место в действительности только в том случае, если бы n -ное количество скважин совершенно точно можно было бы совместить на местности в одной точке. При максимальном сближении скважины будут только касаться стенками обсадных труб и вместо одной воображаемой скважины практически образуют шахтный колодец с относительно большим диаметром; а так как шахтный колодец, отличающийся от скважины только большим диаметром, будет иметь и больший дебит, то суммарный коэффициент влияния всегда будет больше $\frac{1}{n}$, и тем больше, чем большее число скважин будет входить в данную группу взаимодействующих колодцев.

Формулы (6) и (7) показывают, что степень взаимодействия, определяемая величиной суммарного коэффициента влияния, прежде всего зависит от расстояния между скважинами и от их числа.

Очевидно, что чем ближе скважины будут расположены одна к другой и чем больше будет число их, тем больше будет взаимодействие между ними.

По вычислениям Мэската (23) при отношении расстояния между артезианскими скважинами к их радиусу в 800 м и при радиусе влияния в 1500 м степень взаимодействия, характеризуемая изменением величины суммарного дебита скважин с числом их от 1 до 16, определяется следующими цифрами: $Q_1 : Q_2 : Q_3 : Q_4 : Q_5 : Q_6 : Q_{10} = 1,000 : 1,509 : 1,818 : 2,061 : 2,152 : 2,778 : 3,333$, где числовые индексы при Q означают число колодцев, входящих в данную группу взаимодействующих скважин.

Если эти данные нанести на график (рис. 2, кривая I), то можно сказать, что суммарный дебит взаимодействующих скважин значительно увеличивается только при малом числе (примерно 9—10) колодцев. При дальнейшем увеличении числа скважин суммарный дебит увеличивается уже в значительно меньшей степени.

На том же рис. 2 показаны кривые Мэската (II, III), характеризующие увеличение суммарного дебита в зависимости от числа колодцев при расположении их по кругу. Кривая II дает увеличение суммарного дебита при отношении радиуса круга, по которому расположены колодцы, к радиусу колодца, равном 200, и кривая III—равном 80. Радиус влияния в том и другом случае принят равным 1500 м и радиус колодца—75 мм. Обе кривые показывают, что суммарный дебит взаимодействующих артезианских скважин, располагаемых по кругу при числе колодцев выше 9—10, стремится к некоторому практическому пределу.

Таким образом сосредоточение в одном месте значительного числа скважин в целях водоснабжения, нецелесообразно, так как строительная стоимость добавочного числа их не будет оку-

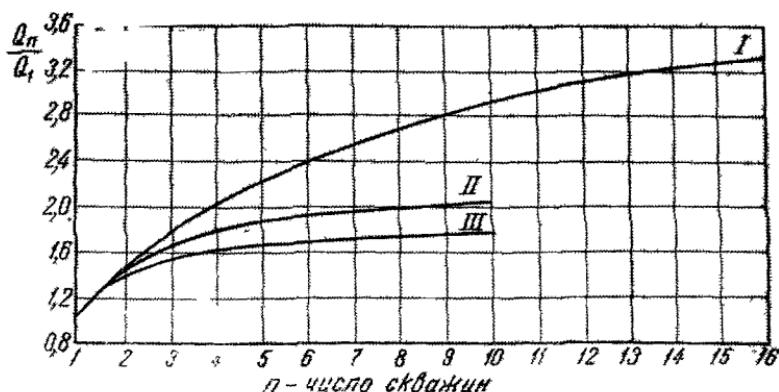


Рис. 2.

патьсяся дополнительным увеличением суммарного дебита. Применение большого числа взаимодействующих скважин в целях искусственного снижения напора или уровня грунтовых вод вполне допустимо, так как при незначительном увеличении суммарного дебита дренирующей установки будет создано более равномерное снижение напора или уровня воды в пределах интересующего в том или ином случае строительного контура.

Особенности взаимодействия в условиях артезианских и грунтовых вод объясняются, главным образом, тем, что при работе взаимодействующих скважин в артезианском потоке над кровлей водоносного горизонта создается область сниженных напоров, но не изменяется мощность водоносного слоя. Наоборот, в грунтовых водах вокруг взаимодействующих скважин образуется воронка депрессии, в пределах которой мощность грунтового потока является величиной переменной. В связи с этим, так же как и для одиночного колодца, необходимы особые методы и формулы для расчета взаимодействующих артезианских и грунтовых колодцев.

Степень взаимодействия, выражаяющаяся в уменьшении дебита скважин, зависит также и от закона движения подземных вод и вида функций, выражющей зависимость дебита от понижения. Влияние этих факторов в настоящее время не изучено, так как все теории, рассматривающие взаимодействующие скважины, основаны на законе Дарси.

Степень взаимодействия при одном и том же числе и при одинаковом расстоянии между скважинами зависит и от их геометрического расположения в плане. Например, суммарный коэффициент влияния будет иметь различное значение для четырех скважин в зависимости от того, будут ли они расположены в один ряд или по вершинам четырехугольника.

Расположение скважин в один или несколько рядов обычно обусловливается линейной формой контура или площади питания. Это может иметь место при питании эксплуатируемых водоносных горизонтов реками, озерами, переливом воды из тектонических трещин в грунтовые потоки, имеющие на довольно значительных участках прямолинейное движение и т. п. Малые группы колодцев, располагаемые в плане по более или менее правильным геометрическим фигурам и занимающие очень незначительный участок по сравнению со всей площадью распространения водоносного горизонта, обычно применяются при замкнутых или почти замкнутых контурах питания, приближающихся по своей геометрической форме к кругу, кассиноидам и другим различного рода овалам. В этом случае всегда предполагается, что питание данной группы скважин происходит со всех сторон. Это может иметь место в артезианских водоносных горизонтах, залегающих мульдообразно, на речных и озерных островах, в аллювиальных водах, приуроченных к излучинам рек с радиальным направлением движения грунтовых вод и т. п.

При эксплоатации жидкых полезных ископаемых (нефть, рассолы) и при осушении пластовых месторождений в целом, или при очистных работах крупных шахтных полей, число эксплоатационных или дренируемых скважин может увеличиться настолько, что ими будет занят очень значительный участок или почти вся площадь распространения водоносного слоя или жидкого полезного ископаемого. В этом случае говорят о расположении взаимодействующих скважин по сеткам. Само собой разумеется, что здесь взаимодействие скважин будет происходить несколько иначе, чем при линейном их расположении или малыми группами.

При расположении скважин по сеткам водоносный пласт как бы разделяется ими на отдельные участки, число которых соответствует числу скважин, а диаметры участков примерно равны половине расстояния между скважинами, составляющими данную сеть (рис. 3). При этом каждая скважина сети дренирует окружающий ее участок водоносного слоя и имеет отдельный замкнутый контур питания, удаленный от ее центра на половину расстояния между скважинами сети. Таким образом при расположении скважин линейном или малыми группами контур питания

всегда находится вне их и удален от них иногда на довольно значительные расстояния. При расположении скважин по сети замкнутые контуры питания проходят внутри ее, окружая каждую скважину в отдельности. При одновременной работе всех скважин, входящих в данную сеть, и при отсутствии питания водоносного слоя сверху (инфилтратия атмосферных осадков) будет происходить почти полное извлечение жидкого полезного ископаемого или частичное осушение водоносного слоя. Следовательно, сеть взаимодействующих скважин почти всегда будет работать в условиях неустановившегося движения, и количество извлекаемой сетью жидкости будет уменьшаться с течением времени.

Из вышесказанного следует, что дебит взаимодействующих скважин, определяемый по формулам для скважин, расположенных в сети, почти всегда следует рассматривать как начальный, корректируя тем или иным способом его величину для отдельных промежутков времени.

Вопрос о зависимости дебита скважин от расстояния и формы (круговой или прямолинейной) контура питания наиболее подробно исследован В. Н. Щелкачевым (20). По его вычислениям, зависимость дебита от расстояния скважин до круговой формы контура питания характеризуется данными, приведенными в табл. 1.

Рис. 3.

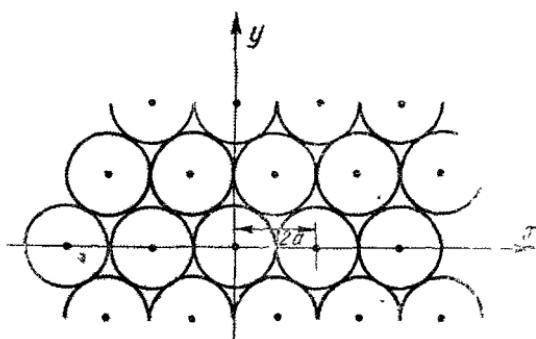


Таблица I

$\frac{a}{R}$	0	0,001	0,01	0,1	0,25	0,5	0,75	0,9	0,99
q	$0,145A$	$0,145A$	$0,145A$	$0,145A$	$0,146A$	$0,151A$	$0,164A$	$0,191A$	$0,334A$

Примечание. R означает радиус круглой формы контура питания, a —расстояние скважин от центра круга, q —единичный дебит, A —некоторое постоянное число.

Из данных табл. 1. следует, что при удалении скважины от центра примерно до половины радиуса круговой формы контура питания дебит скважины практически остается постоянным, а затем по мере приближения к контуру питания постепенно увеличивается в 2—3 раза.

По В. Н. Щелкачеву (20) зависимость дебита скважины от расстояния до прямолинейного контура питания характеризуется данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

a	q	a	q	a	q
r	∞	750 r	0,137 A	25 000 r	0,092 A
2 r	0,759 A	900 r	0,133 A	50 000 r	0,087 A
10 r	0,334 A	990 r	0,132 A	75 000 r	0,084 A
100 r	0,189 A	1000 r	0,132 A	90 000 r	0,083 A
250 r	0,161 A	5000 r	0,109 A	99 000 r	0,082 A
500 r	0,145 A	10 000 r	0,101 A	100 000 r	0,082 A

Примечание. q означает единичный дебит, a —расстояние скважин от прямолинейного контура питания, r —радиус скважин, A —некоторое постоянное число.

Из данных табл. 2 видно, что дебит скважины увеличивается по мере приближения ее к контуру питания и на очень близком расстоянии от него (от 10 r до r) быстро возрастает до бесконечности, однако на расстоянии от 500 до 1000 r он остается почти постоянной величины. То же можно сказать и про интервал расстояний от 10 000 до 100 000 r .

В табл. 3 приведены данные по В. Н. Щелкачеву (20), характеризующие зависимость дебита скважины от формы контура питания.

Таблица 3

$R = r \cdot 10^3$		$R = r \cdot 10^5$	
a	$\frac{Q_{okp}}{Q_{np}} \%$	a	$\frac{Q_{okp}}{Q_{np}}$
10 r	100,1	100 r	100,0
100 r	101,0	1000 r	100,1
250 r	102,2	10 000 r	100,5
500 r	104,3	25 000 r	101,3
750 r	106,9	50 000 r	102,6
900 r	108,7	75 000 r	104,1
1000 r	110,0	90 000 r	105,2
		100 000 r	106,0

Примечание. R —радиус круговой формы контура питания, r —радиус скважин, a —расстояние до контура питания, $\frac{Q_{okp}}{Q_{np}}$ отношение в процентах дебита при круговой к дебиту скважины при прямолинейной форме контура питания.

Данные табл. 3 указывают, что дебит при круговой форме контура питания, хотя и незначительно, но всегда больше дебита при прямолинейном контуре и притом тем больше, чем дальше отстоит скважина от контура питания. Это вполне понятно, так как круговой контур питания отдает воду скважине со всех сторон, в то время как прямолинейный питает ее преимущественно с одной стороны.

В общем исследования В. Н. Щелкачева указывают, что некоторые ошибки в определении формы или расстояния до контура питания не оказывают существенного значения на конечный результат вычисления дебита скважин.

Здесь следует обратить внимание на то, что при приближении скважины к прямолинейному контуру питания дебит ее увеличивается и на очень близких к ней расстояниях (табл. 2) возрастает до бесконечности. Это вполне понятно с точки зрения условий, принятых при выводе соответствующих формул, а именно—при приближении скважины к прямолинейному контуру питания, например к урезу реки, поступление воды со стороны последней будет практически неограниченно велико, и дебит скважины теоретически будет возрастать до бесконечности.

В. Н. Щелкачевым рассмотрен также случай расположения взаимодействующих скважин в крутопадающих слоях (20). Как известно из гидравлики, в случае расположения скважин в крутопадающих слоях высоту напора нужно отсчитывать от какой-либо горизонтальной плоскости, называемой плоскостью сравнения. В частном случае за плоскость сравнения можно принять уровень моря, тогда напор при удельном весе жидкости, равном единице, будет равняться абсолютным отметкам уровня воды.

В. Н. Щелкачев, рассматривая различные случаи расположения скважин в крутопадающих слоях, приходит к таким выводам:

а) наклон пласта не влияет на работу взаимодействующих скважин, если они расположены по простиранию их, или по наблюдению, однако в последнем случае динамические (но не статические. М. А.) уровни воды в них должны находиться на одной и той же абсолютной высоте;

б) если скважины расположены по падению слоев и их динамические уровни находятся на различной абсолютной высоте, то этот случай соответствует расположению скважин, имеющих различную величину понижений, перпендикулярно прямолинейному контуру питания. Для этого случая В. Н. Щелкачевым предложены особые формулы.

Для выяснения зависимости суммарного понижения от величин входящих в формулы для определения дебита взаимодействующих скважин, рассмотрим известную формулу Форхгеймера

$$y^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi k} (\ln R - \ln \sqrt{x_1 x_2 \dots x_n}), \quad (8)$$

где y означает уровень воды в некоторой точке водоносного

слоя, удаленной на расстоянии $x_1, x_2 \dots x_n$ от взаимодействующих скважин, H —начальный уровень или напор грунтовых вод, Q —суммарный дебит группы взаимодействующих скважин, K —коэффициент фильтрации, R —радиус влияния.

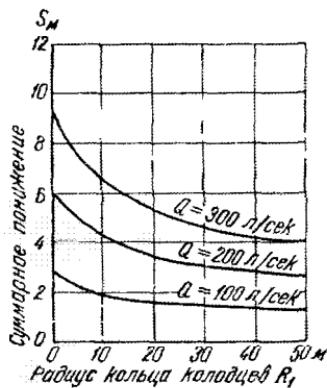


Рис. 4.

случая расположения десяти скважин по кольцу радиусом R_1 и при $H = 20$ м, $K = 0,02$

На рис. 4 показана в центре круга радиусом 200 и 300 л/сек. Из кривых, показанных на рис. 4, следует, что увеличение радиуса круга от 1 до 20–30 м значительно влияет в сторону уменьшения на величину суммарного понижения, и это влияние тем больше, чем больше суммарный дебит скважин.

При радиусе круга R_1 большем 30 м суммарное понижение уменьшается относительно незначительно.

На рис. 5 показана зависимость суммарного понижения от общего дебита скважин при различных значениях радиуса круга R_1 . Кривые, приведенные на рис. 5, показывают, что суммарное понижение значительно увеличивается при увеличении общего дебита и тем больше, чем меньше радиус круга R_1 . Зависимость суммарного понижения

из этой формулы следует, что суммарное понижение в какой-либо точке водоносного слоя будет тем больше, чем больше суммарный дебит и число взаимодействующих скважин, чем меньше коэффициент фильтрации, чем ближе данная точка расположена к ним и чем большей величиной радиуса влияния будем задаваться при производстве расчетов. Такое рассмотрение зависимости величины суммарного понижения от различного рода факторов дает, конечно, только самое общее представление.

Более подробно этот вопрос рассмотрен Кирилесом (10) для скважин по кольцу радиусом R_1 м/сек и $R = 1000$ м. Зависимость суммарного понижения R_1 при постоянных дебитах $Q = 100$,

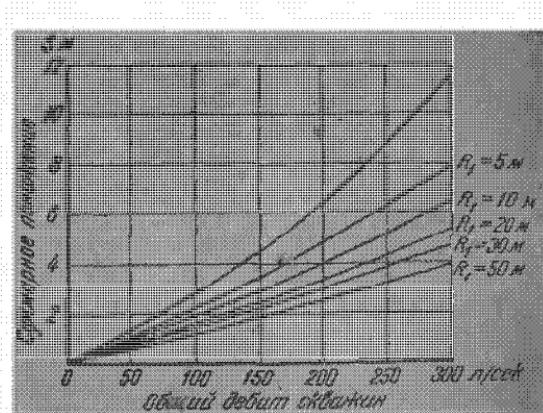


Рис. 5.

от общего дебита так же, как и для одиночного грунтового колодца, по соответствующей формуле Форхгеймера является параболической и определяется формулой:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{(2H-S_1) S_1}{(2H-S_2) S_2}.$$

Если взять радиус круга, по которому расположены скважины, равным 10 м, и общий дебит принять равным 100 л/сек, то понижение в центре круга по формуле Форхгеймера будет равно 1,94 м, а в каждой скважине 2,01 м и в середине между колодцами 1,89 м. Эти данные показывают, что депрессионная поверхность внутри круга будет почти плоской, имеющей небольшую выпуклость к центру круга и к середине между колодцами. Конечно, эта выпуклость будет тем больше, чем больше радиус круга R_1 и чем больше расстояние между колодцами.

Степень взаимодействия скважин в очень значительной степени зависит от водопроницаемости или от коэффициента фильтрации водоносных слоев. Обычно при решении задачи о взаимодействующих скважинах принимается, что водоносный слой, по крайней мере в пределах воронок депрессии, является однородным, т. е. обладающим одинаковой водопроницаемостью во всех направлениях.

Однако в очень большом числе случаев водоносный слой по различным направлениям обладает неодинаковой водопроницаемостью, в связи с чем скважины, расположенные на равных расстояниях, дают различную величину понижения. Очевидно, как и для одиночного колодца, кривая депрессии будет тем круче, чем меньше водопроницаемость водоносных пород.

Степень влияния скважин друг на друга зависит также от диаметра, типа фильтра и величины углубления скважин в водоносный слой (несовершенные колодцы). Однако все эти вопросы до настоящего времени совершенно не изучены. Влияние диаметра фильтра, вероятно, будет несущественным, и поэтому при расчете этим обстоятельством можно пренебречь, тем более, что диаметры опытных скважин обычно мало отличаются от диаметра будущих эксплуатационных скважин. В отношении несовершенных колодцев, согласно указаниям отдельных авторов, высказанным в экспертном порядке, можно применять формулы и поправки, предложенные для одиночных колодцев (поправки Паркера, Замарина, формулы Форхгеймера и Козени).

ГЛАВА II

КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕОРИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ СКВАЖИН

I. Теория Форхгеймера

В задачу настоящего раздела входит только ознакомление с основными методами решения задач о взаимодействующих скважинах. Поэтому излагаемые ниже теории не рассматри-

ваются в полном объеме, а берется только простейший случай двух взаимодействующих скважин. Это дает возможность познакомиться с методами решения задачи и с допущениями, которые при этом принимаются, что в общем позволяет в дальнейшем с достаточным знанием дела применять существующие методы для решения встречающихся на практике задач.

Наиболее широкой известностью пользуются и чаще всего применяются на практике формулы Форхгеймера и различные их видоизменения. Это, вероятно, объясняется тем, что его формулы применяют без каких-либо ограничений для любого числа и различным образом расположенных взаимодействующих буровых скважин.

Для определения уровня грунтовых вод при работе группы взаимодействующих скважин Форхгеймер (19) дает следующие формулы:

$$h_o = \sqrt{y^2 - \frac{Q}{\pi K n} \left(\ln \frac{x_1}{r} + \ln \frac{x_2}{r} + \dots \ln \frac{x_n}{r} \right)}; \\ y = \sqrt{h_o^2 + \frac{Q}{\pi K n} \left(\ln \frac{x_1}{r} + \ln \frac{x_2}{r} + \dots \ln \frac{x_n}{r} \right)}, \quad (9)$$

где y — высота уровня грунтовой воды в интересующей нас точке P , находящейся в пределах района влияния группы скважин;

Q — суммарное количество воды всех колодцев;

r — радиус скважин;

h_o — высота уровня воды в одиночном колодце при условии, что последний при радиусе r дает количество воды Q ;

n — число колодцев,

K — коэффициент фильтрации,

$x_1 x_2 x_n$ — расстояния от точки P , для которой определяется высота уровня воды до центра каждой скважины.

Формула (9) выведена при условии действительности закона Дарси для однородной среды, для скважин, доведенных до водоупора и при условии равенства их дебитов.

Вывод уравнений (9) опубликован Форхгеймером в работе, относящейся к 1898 г. (22¹). Он исходит из уравнения Лапласа (уравнение неразрывности):

$$\frac{d^2 (y^2)}{dx^2} + \frac{d^2 (y^2)}{dy^2} = 0.$$

Если несколько поверхностей уровня, определяемых функциями вида $y^2 = f_1(x, y)$; $y^2 = f_2(x, y)$ удовлетворяют дифференциальному уравнению движения подземных вод, то и поверхность уровня, образованная их алгебраической суммой, будет также удовлетворять этому уравнению; или иначе: сумма частных

¹ В курсе „Гидравлика“ Ф. Форхгеймер ссылается на еще более раннюю работу, относящуюся к 1886 г. (Zeit. d. Arch. und Ing. Ver. Zu Hamb. 32, 1886 г.).

решений также является решением данного дифференциального уравнения.

Действительная депрессионная поверхность, образующаяся от действия одиночных скважин, по Дюпон, определяется такими уравнениями:

$$\begin{aligned} y_1^2 - h_1^2 &= \frac{Q_1}{\pi K} \ln x_1 - \ln r_1; \\ y_2^2 - h_2^2 &= \frac{Q_2}{\pi K} \ln x_2 - \ln r_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогичные уравнения можно написать и для всех других колодцев, входящих в состав данной системы взаимодействующих скважин. При одновременном действии всех скважин нужно наложить (принцип суперпозиций) депрессионные поверхности, складывая для этой цели правые части уравнений (10), написанных для одиночных скважин, и заменяя левые части выражением $y^2 - h^2$:

$$y^2 - h_0^2 = \frac{Q_1}{\pi K} \ln \frac{x_1}{r_1} + \frac{Q_2}{\pi K} \ln \frac{x_2}{r_2} + \dots + \frac{Q_n}{\pi K} \ln \frac{x_n}{r_n}.$$

Если принять радиусы и дебиты всех скважин равными, т. е. $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = \frac{Q}{n}$, где Q — суммарный дебит всех скважин и n — число колодцев, то после вынесения за скобку выражения $\frac{Q}{\pi K n}$ получим одно из указанных выше уравнений (9).

Правильность замены левых частей уравнений (10) выражением $y^2 - h_0^2$ т. е. доказательства того, что

$$\Sigma(y_i^2 - h_i^2) = y^2 - h_0^2,$$

Форхгеймер обосновывает только следующими соображениями. Если допустить, что все суммарное количество воды, получаемое из группы скважин, откачивается из одного колодца, то уравнение кривой депрессии и в этом случае выразится уравнением типа (10):

$$y^2 - h_0^2 = \frac{Q}{\pi K} (\ln x - \ln r). \quad (11)$$

Для точки, удаленной на очень большое расстояние от воображаемого колодца, или точнее в бесконечность, можно полагать, что

$$x_1 = x_2 = \dots = x_n.$$

Тогда при одинаковых радиусах скважин можно написать:

$$y^2 - h_0^2 = \frac{Q}{\pi K} \left(\frac{1}{n} \ln x_1 x_2 \dots x_n - \ln r \right), \quad (12)$$

т. е. уравнение (12) будет аналогично уравнению (9). Отсюда величину h_0 можно трактовать как уровень воды у воображаем-

мого одиночного колодца с дебитом, равным суммарному количеству откачиваемой воды из всех взаимодействующих скважин.

Как следствие из вывода формул Форхгеймера (9) вытекает, что сумма разностей квадратов уровней воды y_i и уровней воды y различных взаимодействующих скважин h_i равно разности квадрата уровня воды в интересующей нас точке y и уровня воды h_0 у воображаемого колодца.

Если уравнение (9) переписать для $x=R$, $y=H$ и для $r=x$, то получим:

$$y^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi K} \left(\ln \sqrt[n]{R_1 R_2 \cdot R_n} - \ln \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdot x_n} \right). \quad (13)$$

Отсюда суммарный расход группы взаимодействующих скважин равен:

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - y^2)}{\ln \sqrt[n]{\frac{R_1 R_2 \cdot R_n}{x_1 x_2 \cdot x_n}}}. \quad (14)$$

Если величины R_1, R_2 значительно превышают размеры участка, занятого группой скважин, то принимают радиус влияния ее равным радиусам влияния отдельных скважин и, кроме того, последние считают равными между собой, т. е. $R_1=R_2=\dots=R_n=R$, где R —радиус влияния группы скважин. Тогда уравнение (14) может быть переписано следующим образом:

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - y^2)}{\ln \frac{R}{\sqrt[n]{x_1 x_2 \cdot x_n}}}. \quad (15)$$

Для определения уровня воды в отдельных точках из уравнения (15) получим такую формулу:

$$y^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi K} \left(\ln R - \ln \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdot x_n} \right). \quad (16)$$

Для взаимодействующих артезианских скважин формула Форхгеймера имеет следующий вид:

$$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R}{\sqrt[n]{rx_1 x_2 \cdot x_{n-1}}}}, \quad (17)$$

где Q —суммарный дебит, r —радиус скважин и x_1, x_2, x_{n-1} —расстояния от одной из скважин до всех остальных, M —мощность артезианского водоносного слоя.

Основным условием вывода формул Форхгеймера является замена действия группы взаимодействующих скважин одним воображаемым колодцем с дебитом, равным суммарному дебиту всех скважин. Эта замена вполне допустима для случая расположе-

ния взаимодействующих скважин по кругу т. е. по периметру воображаемого колодца. Следовательно, рассмотренные выше формулы Форхгеймера действительны и для взаимодействующих скважин, расположенных по кругу, по вершинам правильных многоугольников и, в частном случае, для двух скважин, расположенных как бы на концах диаметра круга. В этих случаях формулы Форхгеймера совпадают с соответствующими формулами Мэската.

Например, для дебита одной из трех скважин ($n=3$), расположенных по вершинам равностороннего треугольника, очевидно, необходимо умножить знаменатель формулы (17) на 3. Отсюда получим:

$$Q_3 = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^3}{rx^2}},$$

где x равно длине стороны равностороннего треугольника. Только что написанная формула полностью совпадает с соответствующей формулой (90) Мэската.

Формулы Форхгеймера можно применять и для скважин, расположаемых по периметру не очень вытянутых прямоугольников, заменив их затем при первоначальных подсчетах равновеликим кругом. При этом для определения дебита обязательно следует брать точку в центре одной из скважин и от нее отсчитывать расстояния до всех остальных.

Форхгеймером даны также формулы для расчета взаимодействующих скважин, расположенных у реки, т. е. при условии прямолинейного контура питания.

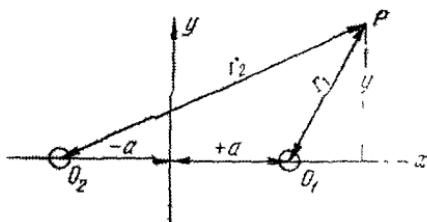


Рис. 6.

2. Теория Слихтера и Лейбензона

В 1898 г. Слихтером были опубликованы формулы для расчета взаимодействующих артезианских скважин (25). Вначале он рассматривает взаимодействие двух скважин, расположенных на расстоянии $2a < 2R$, где R —радиус влияния и a —половина расстояния между скважинами (рис. 6).

Возьмем точку P , находящуюся на расстоянии r_1 от скважины O_1 и на расстоянии r_2 от скважины O_2 . Понижение в точке P от откачки из скважин O_1 будет равно:

$$S' = m' \ln r_1 + c_1$$

■ от откачки из скважины O_2 :

$$S'' = m'' \ln r_2 + C_2,$$

где m' , m'' , C_1 и C_2 —постоянные.

Эти два уравнения получаются следующим путем.

Скорость фильтрации на некотором расстоянии x от скважины будет равна $V = K \frac{ds}{dx}$ где S —понижение на расстоянии x . Таже скорость фильтрации будет обратно пропорциональна расстоянию x от оси колодца, т. е. $V = \frac{C_1}{x}$, где C_1 — некоторая постоянная величина.

Отсюда

$$C_1 \frac{dx}{x} = K dS.$$

После интегрирования этого уравнения получим, что

$$C_1 \ln x = KS + C_1.$$

Приравняв отношение $\frac{K}{C_1} = m^1$ и $\frac{K}{C_2} = m''$, придем к написанным выше уравнениям.

Суммарное понижение в точке P от одновременной откачки из обеих скважин Слихтер полагает равным сумме отдельных понижений. Следовательно, суммарное понижение S будет равно:

$$S = S' + S'' = m_1 \ln r_1 r_2 + C,$$

где

$$m' \ln r_1 + m'' \ln r_2 = m_1 \ln r_1 r_2 \text{ и } C_1 + C_2 = C.$$

Перейдем теперь к прямоугольным координатам (рис. 6), в которых

$$r_1^2 = y^2 + (x - a)^2 \text{ и } r_2^2 = y^2 + (x + a)^2.$$

Тогда суммарное понижение в точке P будет равно:

$$S = \frac{1}{2} m_1 \ln [y^2 + (x - a)^2] [y^2 + (x + a)^2] + C. \quad (19)$$

Коэффициенты m_1 и C найдем, пользуясь следующими условиями: при $S = S_0$ (понижение у колодца O_1), $y = 0$ и $x = a + r$ и при $S = 0$, $y = 0$ и $x = a + R$, где r —радиус колодца и R —радиус влияния. При этих условиях будем иметь два уравнения:

$$S_0 = \frac{1}{2} m_1 \ln(r^2) (2a \pm r)^2 + C = m_1 \ln(2ar + r^2) + C;$$

$$0 = \frac{1}{2} m_1 \ln (R^2)(R + 2a)^2 \pm C = m_1 \ln(R^2 + 2aR) + C.$$

Из этих двух последних уравнений найдем константы m_1 и C (пренебрегая величиной r^2):

$$C = -m_1 \ln(R^2 + 2aR);$$

$$-m_1 = \frac{S_0}{\ln(R^2+2ar) - \ln(2ar)}.$$

Подставив значение m_1 и S в уравнение (19), найдем суммарное понижение в любой точке. Для определения дебита взаимодействующей скважины Слихтер находит средний уклон подземного потока как частную производную от S по y в уравнении (19):

$$\frac{\partial S}{\partial y} + \frac{m_1 y}{y^2 + (x-a)^2} + \frac{m_1 y}{y^2 + (x+a)^2}.$$

У внешнего края колодца $x=a$ и $y=r$. Тогда, пренебрегая отношением $\frac{m_1 r}{r^2 + 4a^2}$, получим, что $\frac{\partial S}{\partial y} = \frac{m_1}{r}$.

Следовательно дебит, равный фильтрующей площади скважины, умноженной на среднюю скорость около нее, будет равен:

$$Q = F \cdot V = 2\pi r M K \frac{m_1}{r} = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^2 + 2ar}{2ar}}, \quad (20)$$

где F —площадь поперечного сечения, V —средняя скорость, M —мощность артезианского водоносного горизонта.

Л. С. Лейбензон (13) в работе, опубликованной в 1934 г., рассматривая задачу Слихтера, берет несколько иные пределы интегрирования и получает иной конечный результат.

Он так же, как и Слихтер, полагает, что для артезианских скважин суммарное понижение будет равно сумме отдельных понижений, и в связи с этим считает, что решение уравнения Лапласа для плоской задачи при наличии двух скважин будет таким

$$h = \frac{Q_1}{2\pi} \ln r_1 + \frac{Q_2}{2\pi} \ln r_2 + C. \quad (21)$$

В этом уравнении исключены мощность артезианского горизонта и коэффициент фильтрации, так как их можно подставить в конечный результат, рассматривая сейчас расход при $K=1$ и мощности водоносного горизонта, равной единице.

Далее Л. С. Лейбензон, так же как и Слихтер, принимает, что первоначальный напор H остается неизменным на расстоянии R по оси y от начала координат (рис. 7). Следовательно:

$$O_1 M = O_2 M = \sqrt{R^2 - a^2}.$$

Если $h=H$, то $r_1=r_2=\sqrt{R^2 - a^2}$, а при $h=h_0$, где h_0 означает уровень воды у внешней стенки скважины O_2 , $r_1=2a$ и $r_2=r_1$, где r —радиус скважин. Далее, считая Q_1 равным Q_2 и заменяя в формуле (21) r_1 через r и r_2 через $2a$, получим, что:

$$h_o = \frac{Q}{2\pi} \ln(2ar) + C.$$

Вычтя это уравнение из уравнения (21), будем иметь:

$$h = h_o + \frac{Q}{2\pi} \ln \frac{r_1 r_2}{2ar}$$

Для верхнего предела получим при $h = H$ и при $r_1 = r_2 = \sqrt{R^2 + a^2}$.

$$H = h_o + \frac{Q}{2\pi} \ln \left(\frac{R^2 + a^2}{2ar} \right).$$

Отсюда дебит одной скважины с учетом влияния будет равен:

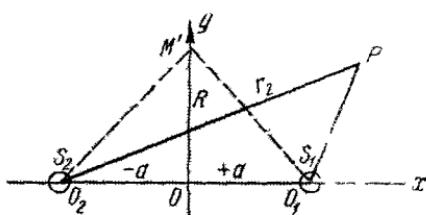


Рис. 7.

$$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^2 + a^2}{2ar}}, \quad (22)$$

где K — коэффициент фильтрации, M — мощность артезианского водоносного слоя.

Возьмем теперь отношение дебита взаимодействующей скважины Q' к дебиту не взаимодействующей Q :

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{\ln \frac{R}{r}}{\ln \left(\frac{R^2 + a^2}{2ar} \right)}. \quad (23)$$

При $a = R$, т. е. когда скважины будут расположены на расстоянии двух радиусов влияния, будем иметь следующее значение коэффициента влияния β :

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{\ln \frac{R}{r}}{\ln \left(\frac{R^2 + R^2}{2Rr} \right)} = 1,$$

т. е. скважины не влияют друг на друга.

При $a = 2r$, т. е. когда скважины будут расположены рядом, коэффициент влияния β будет равен:

$$\beta = \frac{Q'}{Q} = \frac{\ln \frac{R}{r}}{\ln \left(\frac{R^2 + 4r^2}{4r^2} \right)} = \frac{\ln \frac{R}{r}}{2 \ln \left(\frac{R}{r} + 1 \right)} \approx \frac{1}{2}.$$

Переходя к оценке формул Ч. Слихтера и Л. С. Лейбензона прежде всего нужно отметить, что эту группу формул нельзя считать строго доказанной с гидромеханической точки зрения, во-первых, потому, что пограничные условия были удовлетворены лишь для отдельных точек, а не обусловлены определенными формами контура питания, и во-вторых, потому, что выбор точек, для которых выполнялись определенные пограничные условия,

до некоторой степени является условным. Например, Ч. Слихтер для получения пограничных условий принимает то точку, лежащую в центре скважин, то точку, лежащую на их внешнем контуре, в связи с чем до известной степени произвольно приравнивает к нулю или x или y .

Точку на контуре питания оба автора также выбирают до известной степени произвольно, то по оси x , то по перпендикулярному к ней направлению по оси y . Таким образом радиус влияния отсчитывается в одном случае от внешней стенки одной из крайних скважин, а в другом—от точки, лежащей по середине между ними.

Правда, как это будет видно из дальнейшего, для практических расчетов все эти допущения не имеют особенно существенного значения.

3. Теория Мэската и Щелкачева

М. Мэскат (M. Muskat) в работе, опубликованной в 1937 г. (25), пользуясь теорией комплексных переменных векторов, указывает, что распределение давления можно найти из следующего уравнения, являющегося решением уравнения Лапласа:

$$P(x, y) = C + \frac{1}{2\pi K} \sum_j Q_j \ln(z - z_j), \quad (24)$$

где z означает комплексный вектор $(x+iy)$. Среднее давление P_0 , по замкнутому контуру радиусом r_j , центр которого удален на расстояние, определяемое комплексным вектором r_j (рис. 8), будет равно, если при этом учесть, что радиус колодца очень незначителен по сравнению с другими величинами,

$$P_j = \frac{1}{2\pi r_j} \oint P^d S, \quad (25)$$

где символ \oint , указывающий контур радиуса r_j , который охватывает точку $z=z_j$.

Если на некотором расстоянии $(z_2 - z_1)$, равном $2a$, будем иметь вторую скважину, то

$$\oint_{z_1} \ln(z - z_1) dS = 2\pi r_1 \ln r_1,$$

$$\oint_{z_2} \ln(z - z_2) dS = 2\pi r_1 \ln 2a.$$

На основании уравнений (24 и 25) и последних двух соотношений следует, что давление в любой точке замкнутого контура радиуса R будет определяться следующим общим выражением:

$$P_j = C + \frac{Q_j}{2\pi K} \ln r_j + \frac{1}{2\pi K} \sum_i Q_i \ln 2a, \quad (26)$$

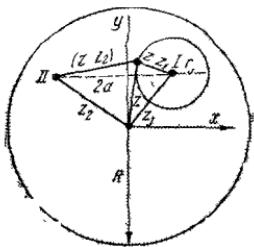


Рис. 8.

давление же на внешнем контуре радиуса R будет равно:

$$P = C + \frac{1}{2\pi K} \Sigma Q_j \ln R. \quad (27)$$

Для двух взаимодействующих скважин, расположенных внутри кругового контура радиуса R на расстоянии, равном $2a$ (рис. 8) на основании уравнений (26) и (27) получим:

$$h = C + \frac{Q_1}{2\pi K} \ln r + \frac{Q_2}{2\pi K} \ln 2a,$$

$$h = C + \frac{Q_1}{2\pi K} \ln 2a + \frac{Q_2}{2\pi K} \ln r,$$

$$H = C + \frac{Q_1}{2\pi K} \ln R + \frac{Q_2}{2\pi K} \ln R.$$

Из этих уравнений следует, что дебит взаимодействующей скважины будет равен:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^2}{2ar}}, \quad (28)$$

где M —мощность артезианского водоносного горизонта. Из формулы (28) следует, что одиночная скважина будет давать такое же количество воды что и две взаимодействующие, если ее радиус r_1 будет равен:

$$r_1 = \sqrt{2ar}.$$

Например, при радиусе скважин, равном 0,1 м и при расстоянии между ними 100 м, тот же дебит можно получить из шахтного колодца радиусом:

$$r = \sqrt{100 \cdot 0,1} = 3,16 \text{ м.}$$

Если $a=R$ при расположении скважин на расстоянии двух радиусов влияния и если $r=a$ при расположении их рядом, то коэффициент влияния по формуле М. Мэската для этих двух случаев будет равен:

$$\beta = \frac{\ln \frac{R}{r}}{\ln \frac{R^2}{2Rr}} = \frac{\ln \frac{R}{r}}{\ln \frac{R}{r} - \ln 2} \cong 1,$$

$$\beta = \frac{\ln \frac{R}{r}}{\ln \frac{R^2}{2r^2}} = \frac{\ln \frac{R}{r}}{2\ln \frac{R}{r} - \ln 2} + \frac{1}{2}.$$

В 1939 г. вышла в свет очень обстоятельная и интересная работа В. Н. Щелкачева и Г. В. Пыхачева (20), в которой методом отображения источников и истоков дано решение ряда задач о взаимодействующих скважинах. Метод этот в общем состоит

в том, что к скважинам, называемым в данном случае стоками, из которых производится откачка, добавляется то же число симметрично к ним расположенных по правилам инверсии источников, изображающих скважины, в которые нагнетается количество воды, равное откачиваемому из скважин-стоков. Расположение источников, т. е. их расстояние по прямой линии от стоков, определяется, как было подчеркнуто выше, соответствующими правилами инверсии (обращение), представляющей особое математическое преобразование точек одной плоскости в другую; при этом каждой точке M соответствует точка M_1 в другой плоскости, лежащая с ней на одной прямой, так что произведение расстояний этих точек до центра инверсии является величиной постоянной.

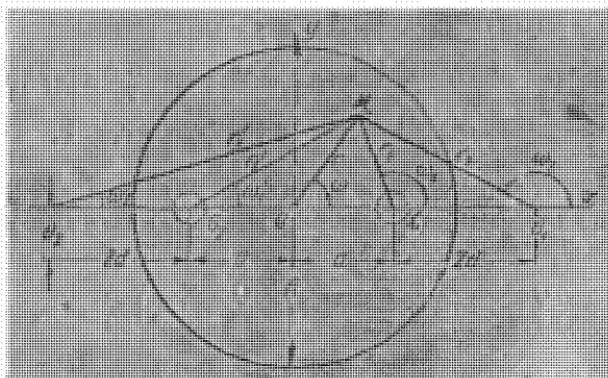


Рис. 9.

Далее, на основании суперпозиции полей составляется характеристическая функция сложного поля, возникающего при взаимодействии стоков и отраженных источников. Таким образом при удельном весе жидкости, равном единице, характеристическая функция сложного поля, образующегося при взаимодействии скважин, будет найдена из следующего уравнения:

$$F(z) = \frac{Q}{2\pi KM} \ln(z_1 z_2 \cdots z_n) + C. \quad (29)$$

Проиллюстрируем все это на примере взаимодействия двух скважин, расположенных внутри кругового контура питания с радиусом R . Допустим, что мы имеем два стока — C_1 и C_2 расположенные на расстоянии $2a$ друг от друга (рис. 9).

Находим расстояние $2d$ от них до двух зеркально отраженных источников U_1 и U_2 при помощи формулы:

$$d = \frac{R^2 - a^2}{2a},$$

из которой следует, что произведение расстояний стоков и источников до точки O —центра инверсии— постоянно, так как

$$\alpha(2d+a)=R^2$$

На основании принципа суперпозиции полей характеристическая функция сложного поля двух стоков и двух источников при условии равенства их дебитов будет такова:

$$F(z) = \frac{Q}{2\pi KM} \ln(z-a-2d) - \frac{Q}{2\pi KM} \ln(z-a) - \\ - \frac{Q}{2\pi KM} \ln(z+a) + \frac{Q}{2\pi KM} \ln(z+a+2d), \quad (30)$$

где z —комплексное число, соответствующее некоторой точке M . В полиполярных координатах z равно:

$$z=re^{i\omega}; \quad z-a-2d=r'_2 e^{i\omega_2}; \quad z-a=r'_1 e^{i\omega_1}; \\ z+a=r_1 e^{i\omega_1} \quad \text{и} \quad z+a+2d=r_2 e^{i\omega_2}.$$

Пользуясь этими координатами и разделяя действительные и мнимые части, можно характеристическую функцию переписать следующим образом:

$$F(z) = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{r_2 r'_2}{r_1 r'_1} + i \frac{Q}{2\pi KM} (\omega_2 + \omega'_2 - \omega_1 - \omega'_1).$$

Величина напора в любой точке будет определяться действительной частью характеристической функции:

$$h_i = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{r_1 r'_1}{r_2 r'_2} + C. \quad (31)$$

Для контура, совпадающего с внешней стенкой скважины C_1 (рис. 9), r_1 равно r —радиусу скважины, $r_2=2d$, $r'_1=2a$ и $r'_2=2(a+d)$. Следовательно, величина напора у внешней стенки скважины, учитывая, что $d=\frac{R^2-a^2}{2a}$,

$$h = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \left(\frac{2a^3 r}{R^4-a^4} \right) + C. \quad (32)$$

Для точек внешнего контура питания приближенно можно считать, что

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r'_1}{r'_2} \cong \frac{a}{R},$$

откуда:

$$H = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{a^2}{R^2} + C.$$

Вычтя из последнего уравнения уравнение (32), найдем, что дебит одной из взаимодействующих скважин будет равен

$$Q = \frac{2 \pi KMS}{\ln \frac{R^4 - a^4}{2 R^2 - ar}}. \quad (33)$$

Напор в любой точке определяется из следующего уравнения:

$$h_i = h + \frac{Q}{2 \pi K M} \ln \left(\frac{R^4 - a^4}{2 a^3 r} \cdot \frac{r_1 r_1}{r_2 r_2} \right). \quad (34)$$

В. Н. Щелкачев указывает, что для вычисления коэффициента влияния нужно брать дебит одиночной скважины, но эксцентрично расположенной или, что то же, удаленной от центра кругового контура питания на расстояние C . Для дебита эксцентрично расположенной скважины им выведена формула, аналогичная соответствующей формуле М. Мэската. Взяв отношение дебитов по этой формуле и по формуле (33), найдем, что коэффициент влияния при $a=r$, пренебрегая значением $\frac{r}{R}$ и $\frac{r^2}{2R^2}$, будет равен:

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{\ln \frac{R^2 - a}{R^2}}{\ln \frac{R^4 - a^4}{2 R^2 r^2}} = \frac{\ln \left(\frac{R}{r} - \frac{r}{R} \right)}{2 \ln \left(\frac{R}{r} - \frac{r}{R} \right) \ln 2} \approx \frac{1}{2}.$$

При $a=R$, т. е. при расположении скважин на расстоянии двух радиусов контура питания, коэффициент влияния приближенно будет равен единице.

Допустим, что мы имеем скважину, расположенную на расстоянии d от прямолинейного контура питания CA и на расстоянии a от перпендикулярного к нему водонепроницаемого контура AB (рис. 10). Для этого случая В. Н. Щелкачев ставит следующие условия: „Проекция скорости на направление перпендикуляра к контуру AB должна быть равна нулю, т. е. ни одна линия тока не должна пересекать контура AB , а изобары (линии равных напоров. М. А.) должны пересекать этот контур под прямым углом“. Если продолжить контур питания (пунктирная линия на рис. 10) и вообразить по другую сторону контура AB скважину, находящуюся на тех же расстояниях d и a , то, обращая внимания на наличие водонепроницаемого контура, получим случаи взаимодействия двух скважин.

Одна половина этой гидродинамической сетки как раз удовлетворяет условию, поставленному выше. Итак оказывается, что водонепроницаемый контур влияет и уменьшает дебит скважины аналогично влиянию другой, зеркально отраженной скважины 2. Поэтому по В. Н. Щелкачеву дебит скважины, находящейся в этих условиях, будет равен:

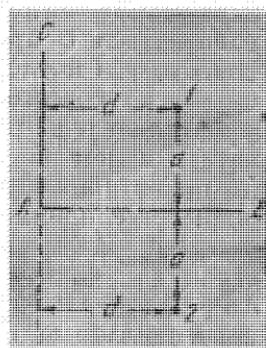


Рис. 10.

$$Q = \frac{2\pi KM \cdot S}{\ln \frac{2d}{r} \sqrt{1 + \frac{d^3}{a^3}}} . \quad (35)$$

Если бы вдоль контура питания было расположено несколько скважин, то их нужно отобразить одинаковым числом скважин стоков, симметрично расположенных по другую сторону водонепроницаемого контура. Таким образом задачу о трех и четырех взаимодействующих скважинах, расположенных перпендикулярно водонепроницаемому контуру, можно свести к задаче шести и восьми скважин, расположенных параллельно прямолинейному контуру питания.

Переходя к оценке формул М. Мэската и В. Н. Щелкачева, можно сказать, что эти формулы имеют более строгое гидромеханическое обоснование и потому более правильно решают задачу о взаимодействующих скважинах, если только заранее согласиться с принятыми авторами формами контуров питания. Но как раз последнее обстоятельство, главным образом в отношении кругового контура питания, и не является доказанным, а принимается ими как данное, что, конечно, нуждается в соответствующем подтверждении, повидимому, в основном, опытными материалами. Это замечание связано с тем, что в природных условиях, учитывая форму естественных областей питания, как раз круговая форма имеет относительно редкое распространение. Формулы М. Мэската и В. Н. Щелкачева при принятых ими условиях дают более точное решение, поскольку допущения, сделанные при их выводе, имеют практически ничтожное значение. Это особенно обстоятельно доказано в работе В. Н. Щелкачева, но на этом мы здесь не имеем возможности остановиться.

Ввиду того, что в работах М. Мэската и В. Н. Щелкачева дано решение довольно большого и разнообразного числа случаев, их формулы, несомненно, получат более широкое применение на практике по сравнению с формулами Ч. Слихтера и Л. С. Лейбензона.

Заканчивая обзор формул, основанных на гидромеханическом решении, сравним их между собой в отношении получаемых результативных данных. Для этой цели сопоставим формулы Слихтера, Лейбензона, Мэската, Щелкачева и Форхгеймера для двух взаимодействующих артезианских скважин. Эти формулы и результаты подсчетов по ним приведены в табл. 4.

Из данных табл. 4 следует, что под знаком логарифма во всех формулах основное значение имеет выражение $\frac{R^2}{2ar}$.

К этому выражению в формуле Слихтера добавляется величина $\frac{R}{r}$, в формуле Лейбензона величина $\frac{a}{2r}$, а в формуле Щелкачева все это еще умножается на величину $(1 - \frac{Q^2}{K^2})$. В формуле Форхгеймера, по сравнению с формулой Мэската, под

Таблица 4

Авторы	Слихтер	Лейбензон	Мэскат	Щелкачев	Форхгеймер
Формула	$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^2 + 2ar}{2ar}}$	$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^2 - a^2}{2ar}}$	$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^2}{2ar}}$	$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^4 - a^4}{2R^2 - ar}}$	$Q_{1+2} = \frac{2\pi RMS}{\ln \frac{R}{\sqrt{2ar}}}$
Преобразованное значение выражения, стоящего под знаком логарифма	$\frac{R^2}{2ar} + \frac{R}{r}$	$\frac{R^2}{2ar} + \frac{a}{2r}$	$\frac{R^2}{2ar}$	$\left(\frac{R^2}{2ar} + \frac{a}{2r}\right) \cdot \left(1 + \frac{a^2}{R^2}\right)$	$\frac{R^2}{2ar}$
Значение этого выражения при $R=100$, $a=10$ и $r=0,1$	6000	5050	~ 5000	5050	~ 5000
То же при $R=1000$, $a=10$ и $r=0,1$	510 000	500 500	500 000	500 000	500 000
То же при $R=1000$, $a=100$ и $r=0,1$	60 000	50 500	50 000	50 000	50 000
Натуральные логарифмы этих выражений	8 689 13 128 10 989	8 517 13 108 10 817	8 510 13 108 10 808	8 517 13 108 10 817	8 510 13 108 10 808

знаком логарифма стоит величина, равная корню квадратному из выражения $\frac{R^2}{2ar}$.

Но, поскольку в этой формуле Q_{1+2} означает суммарный дебит, т. е. в данном случае дебит двух скважин, для получения сравнимых результатов необходимо знаменатель умножить на 2. В результате получается полное совпадение с формулой Мэската.

Следовательно, значение натуральных логарифмов знаменателя во всех формулах получается почти одно и то же, причем разница между ними будет тем меньше, чем больше R по сравнению с a . Поэтому, учитывая погрешности в определении R и K , далеко выходящие за пределы погрешностей подсчетов по этим формулам, следует признать, что практически, несмотря на кажущиеся различия в этих формулах, они дают один и тот же конечный результат подсчетов. Поэтому практически подсчеты удобнее всего вести по наиболее простым формулам.

В табл. 4 значения R , a и r были взяты до известной степени случайными; поэтому интересно сравнить, что дают эти формулы в отношении подсчетов коэффициента влияния β при различных отношениях R к a и R к r . За основу возьмем таблицу значений коэффициентов влияния, вычисленных Л. С. Лейбензоном по его формуле, и дополнительно подсчитаем значение этого коэффициента по формулам Слихтера, Мэската, Щелкачева и Форхгеймера. Результаты этих подсчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значение β по различным формулам

По формуле	$\frac{R}{a} = 1$	$\frac{R}{a} = 2$	$\frac{R}{a} = 3$	$\frac{R}{a} = 4$	$\frac{R}{a} = 10$	$\frac{R}{a} = 100$	$a=r$
Слихтера	0,97	0,91	0,98	0,86	0,79	0,64	0,53
Лейбензона	1,00	0,97	0,93	0,90	0,81	0,64	0,53
Мэската	1,11	1,00	0,94	0,91	0,81	0,64	0,53
Щелкачева	~1,00	1,01	0,94	0,91	0,81	0,64	0,53
Форхгеймера	1,11	1,00	0,94	0,91	0,81	0,64	0,53

Приложение. При всех подсчетах отношение $\frac{R}{r}$ принимается равным 1000, и результаты подсчетов округляются до двух десятичных знаков.

Из данных табл. 5 видно, что в отношении вычисления величины коэффициента влияния все формулы дают практически один и тот же результат, от $a = \frac{R}{3}$ до $a = r$, что еще раз подтверждает уже ранее высказанное в этом отношении положение. Но если это отношение меньше 3, то коэффициент влияния, подсчитываемый по различным формулам, получает разное значение, что связано с различной трактовкой понятия о радиусе влияния. Так, например, по формуле Лейбензона, и в особенности по формуле Слихтера, при $R=2a$ коэффициент влияния получается равным соответственно 0,97 и 0,91, а по формулам Мэската и Щелкачева 1,00 и 1,01. Следовательно, по формулам двух последних авторов получается, что влияние скважин друг на друга прекращается при расположении их на расстоянии, большем одного радиуса контура питания.

Наоборот, по формулам Слихтера и Лейбензона влияние между скважинами будет отсутствовать только при расстоянии между ними, равном двум радиусам влияния или питания.

В результате рассмотрения формул для расчета взаимодействующих скважин, полученных гидромеханическим путем, можно сделать следующие общие выводы:

1. В настоящее время гидромеханическим путем, вследствие сложности задачи, еще не найдено достаточно полного и удоб-

ного для практики решения проблемы взаимодействующих скважин.

2. Полученные формулы не проверены на практике, и точность подсчета по ним всецело зависит от точности определения величин коэффициента фильтрации и в особенности радиусов влияния или питания.

3. Полученные формулы далеко не охватывают всех встречающихся весьма разнообразных на практике случаев разных комбинаций числа и взаимного расположения скважин, различных законов движения подземных вод, различных типов зависимостей дебита от понижения, и различной водообильности скважин, обусловленной различной водопроницаемостью отдельных участков водоносного слоя; кроме того, применение полученных формул ограничивается случаем так называемых совершенных колодцев, т. е. скважин, доведенных до нижнего водоупора, вскрывающих всю мощность водоносного слоя.

4. По полученным формулам, как не учитывающим сопротивления труб, сопротивления фильтров и явления разрыва уровней, можно подсчитывать величину напоров только у внешней стенки обсадных труб, но нельзя заранее по ним подсчитать положение динамического уровня внутри скважин, что в большинстве случаев имеет первенствующее значение.

5. Если оставить в стороне споры о понятиях радиусов влияния и питания, то практически все формулы дают один и тот же количественный результат, а потому для подсчетов следует выбирать наиболее простейшие из них.

6. Многие формулы выведены при условии равенства расстояний между скважинами, что в ряде случаев ограничивает возможность использования их.

4. Гидравлический метод Альтовского

В ранее рассмотренных методах коэффициент влияния взаимодействующих скважин играет подсобную роль и используется только для сравнительной характеристики явления взаимодействия. Наоборот, в методе, предложенном автором настоящего труда, этот коэффициент, а также и коэффициент снижения дебита приобретают первенствующее значение.

В гидравлическом методе прежде всего на основании данных одиночных или групповых откачек определяются коэффициенты влияния и снижения дебита, и далее при пользовании ими и основными формулами (5) вычисляется дебит взаимодействующих скважин. Таким образом в методе Альтовского основное внимание уделяется способам и формулам, посредством которых для различных случаев можно определять суммарные коэффициенты влияния и снижения дебита. Гидравлический метод, как впрочем и все остальные методы, разрешает задачу о взаимодействующих скважинах для случая установившегося движения подземных вод.

Поэтому в качестве основной предпосылки гидравлического метода расчета взаимодействующих скважин нужно считать следующее положение: откачка воды как из опытных, так и из проектируемых эксплоатационных скважин производится не из резервуара, а из потока подземных вод, причем его естественные расходы или его возобновляемые запасы, при любых практических целесообразных понижениях превосходят суммарный дебит взаимодействующих скважин. Следовательно, заранее предполагаем, что количество откачиваемой воды в течение довольно длительного времени, по крайней мере, на период амортизации сооружения, вполне обеспечивается естественным притоком воды в эксплоатируемый водоносный слой. Это дает право в дальнейшем рассматривать дебит буровых скважин только как функцию понижения и считать его величиной, не изменяющейся во времени.

Кроме того, также предполагается, что в откачиваемой жидкости нет нерастворимых газов и не происходит сколько-нибудь существенного их выделения при пониженных давлениях, т. е. в процессе эксплоатации. Эту предпосылку нужно сделать только потому, что в настоящее время еще не имеется достаточно обоснованных зависимостей дебита от понижения при откачке газированных жидкостей. Но если в том или ином случае эта зависимость будет установлена, или будет доказана возможность использования одной из существующих, то расчет взаимодействующих скважин не представляет особых затруднений и в случае откачки газированных жидкостей.

Этими двумя предпосылками, по сути дела, и ограничивается весь основной перечень условий применения гидравлического метода расчета взаимодействующих скважин.

Основной принцип этого метода можно сформулировать так: при взаимодействии буровых скважин вид и численное значение параметров, входящих в функцию, выражающую зависимость дебита от понижения, не изменяется, если за новый статический уровень воды принять тот, который получится в результате влияния откачки воды из других скважин.

Следствием этого основного принципа является следующее положение: отличие функций, выражающих зависимость дебита от понижения, без учета и с учетом влияния, будет заключаться только в уменьшении переменной величины понижения S на постоянную величину срезки уровня воды t , возникающую вследствие откачки постоянного количества воды из соседних влияющих скважин. Следовательно, зависимость дебита от понижения без учета влияния будет выражаться функцией $f(S)$, а с учетом влияния — функцией $f(S - t)$.

Несколько упрощая основную мысль этого принципа, можно для него дать вторую формулировку: удельный дебит не зависит от абсолютной величины столба воды в скважине. Например, если в данной скважине удельный дебит был равен 5 л/сек при понижении в ней на 10 м, то, при уменьшении статического

уровня воды в результате влияния других скважин на 2 м, тот же удельный дебит получится при понижении в 12 м, считая от прежнего, неизменного, за счет влияния статического уровня воды.

Этот принцип для прямолинейной зависимости дебита от понижения не нуждается в каких-либо особых доказательствах, так как в данном случае удельный дебит скважин не зависит не только от величин столба воды в скважине H , но даже и от понижения уровня воды S . Для других зависимостей $Q = f(S)$ (степенных и параболических) справедливость основного принципа может быть доказана некоторыми общими положениями, подкрепленными рядом опытных данных. Все это приведено в работе М. Е. Альтовского „Взаимодействие скважин“, 1941.

Укажем, что при взаимодействии скважин происходит только перераспределение течения воды, но не изменяются сопротивление водопроницаемой среды и фильтров, а также законы движения, по крайней мере для всех точек, удаленных на некоторое расстояние от стенок скважин. Поэтому у нас нет основания предполагать изменения вида функций $Q = f(S)$.

По Форхгеймеру зависимость дебита от понижения во взаимодействующих грунтовых колодцах является параболической, так же как и для одиночного грунтового колодца по формуле Дюпюи. Параметр, входящий в формулы $Q = f(S^1)$, например $Q = q\sqrt{S}$, означает просто удельный дебит при понижении, равном единице. Его значение зависит только от разности напора, но не от абсолютной величины столба воды в скважине. Скважины, отличающиеся друг от друга лишь величиной H , будут иметь одинаковые зависимости $Q = f(S)$, но разные максимальные дебиты, поскольку в скважине, имеющей большую величину H , можно будет создать и большее понижение.

Таким образом результат влияния скважин аналитически может быть учтен параллельным перенесением оси координат из точки O , соответствующей неизменному за счет влияния статическому уровню воды, в точку, удаленную от начала координат на величину срезки уровня воды t , фиксирующую новое измененное положение высоты статического уровня воды в скважине.

Для пояснения основного принципа и вытекающих из него положений рассмотрим схемы кривых дебита, показанных на рис. 11 и 12. На рис. 11 изображены прямолинейные, а на рис. 12 криволинейные зависимости дебита от понижения, помеченные без учета влияния цифрой 1, и с учетом его — цифрой 2. В случае прямолинейной зависимости кривые дебита согласно основному принципу изображаются рядом параллельных прямых, имеющих один и тот же тангенс угла наклона к оси понижений, равный удельному дебиту, являющемуся в данном случае величиной постоянной. Зависимость дебита от понижения без учета влияния, как известно, выражается уравнением $Q = qS$. Если параллельно перенести ось Q вдоль оси понижений на величину t^1 , равную срезке уровня воды, получающейся за счет влияния, и за начало координат считать точку L , то зависимость

дебита от понижения попрежнему будет выражаться уравнением $Q = qS$; если же за начало координат принимать точку O , т. е. отсчитывать понижения от прежнего, неизменного за счет влияния, статического уровня воды, то прямая линия 2 (кривая дебита с учетом влияния), очевидно, выразится уравнением $Q = q(S - t^1)$. На рис. 12 показаны две криволинейные зависимости дебита от понижения. Если величина последнего изменяется от неизменного статического уровня воды, т. е. от точки O , то кривая дебита может быть выражена функцией $Q = f(S)$ (например, $Q \propto \sqrt{S}$). При перенесении начала координат в точку L , отстоящую от точки O на величину срезки уровня воды t^1 то функция, выражающая зависимость дебита от понижения

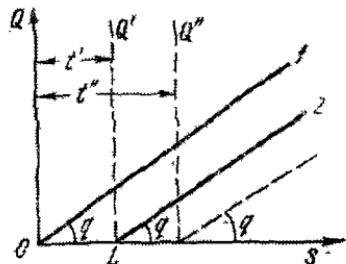


Рис. 11.

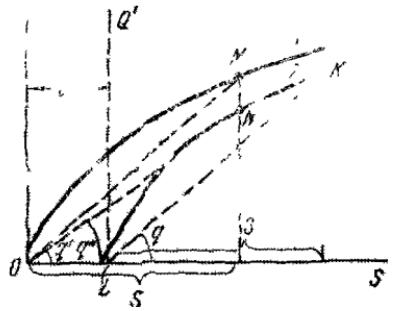


Рис. 12.

согласно основному принципу останется без изменения. Следовательно, и кривая дебита с учетом влияния, отмеченная на рис. 12 цифрой 2, попрежнему может быть выражена уравнением $Q = f(S)$, а при измерении понижения точки O — уравнением $Q = f(S - t^1)$.

Для точки M кривой дебита без учета влияния величина удельного дебита при понижении S , измеренном от точки O , будет равна q' (рис. 12). Увеличим это понижение на величину срезки уровня воды, или отсчитаем ту же величину понижения от точки L ; тогда удельный дебит для точки K кривой дебита с учетом влияния будет равен тангенсу угла наклона прямой линии LK . На рис. 12 видно, что линии OM и LK параллельны, что вытекает из следующего тождества:

$$f(S) = f(S - t^1 + t^1).$$

Следовательно, удельные дебиты для точек M и K будут равны друг другу а потому, изменив абсолютную величину столба воды в скважине H на величину t^1 , но создав в ней от но-

вого статического уровня (точка L) то же самое понижение S , мы не изменим величины удельного дебита и получим из скважины то же количество воды, которое получалось из нее при понижении S без учета влияния.

Если для различных точек кривой дебита с учетом влияния (например, для точки N) (рис. 12) будем отсчитывать понижение от точки O , то, очевидно, получим некоторый, меньший по сравнению с прежним, удельный дебит q'' .

Зависимость дебита от понижения без учета влияния, как известно из литературы, выражается следующими формулами:

$$.. = qS; \quad Q = aS - bS^2; \quad S = aQ + bQ'';$$

$$Q = q' \sqrt[m]{S}; \quad Q = q \sqrt[m]{S}; \quad Q = a + b \cdot \lg S.$$

Если согласиться с основным принципом, то та же зависимость, с учетом влияния, должна выражаться уравнениями:

$$Q = q(S - t^1); \quad Q = a(S - t^1) - b(S - t^1)^2; \quad S - t^1 = aQ + bQ'',$$

$$Q = q' \sqrt[m]{S - t^1}; \quad Q = q \sqrt[m]{S - t^1}; \quad Q = a + b \lg(S - t^1),$$

где t^1 — действительная срезка уровня воды, получившаяся в результате взаимного влияния буровых скважин.

Возьмем сначала прямолинейную зависимость дебита от понижения (рис. 13). Эта зависимость без учета влияния выражается прямой линией OM , а с учетом влияния, согласно основного принципа, то же прямой линией KN , параллельной линии OM . Найдем теперь величину NL (рис. 13), т. е. дебит скважины с учетом влияния при понижении, равном S_0 . Если мы примем сниженный в результате влияния на срезку t^1 статический уровень воды за расчетный, то $NL = q'(S_0 - t^1)$; если же расчет производить от несниженного статического уровня, т. е. от точки O , то $NL = q''S_0$, где q'' удельный дебит с учетом влияния. Приравнивая только что полученные соотношения друг другу, будем иметь:

$$q'(S_0 - t^1) = q''S_0, \quad \text{или} \quad 1 - \frac{q''}{q'} = \frac{t^1}{S_0}. \quad (36)$$

Следовательно, коэффициент дебита α будет равен:

$$\alpha = 1 - \frac{Q''}{Q'} = 1 - \frac{q''}{q'} = \frac{t^1}{S_0}, \quad (37)$$

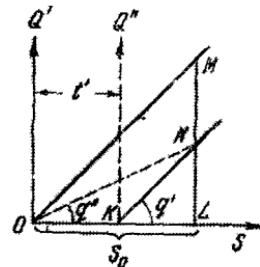


Рис. 13.

а коэффициент влияния β :

$$\beta = 1 - \frac{t'}{S_o} . \quad (38)$$

Из формул (37) и (38) следует, что коэффициенты влияния и снижения дебита могут быть определены при пользовании отношением действительной срезки уровня воды t' к понижению S_o .

Найдем теперь значение этих коэффициентов для других видов зависимости дебита от понижения.

Допустим, что для данных взаимодействующих скважин зависимость дебита от понижения выражается формулой Краснопольского. В этом случае согласно основному принципу дебиты скважин без учета влияния Q' и с учетом влияния Q'' будут соответственно равны:

$$Q' = q\sqrt{S'} \quad \text{и} \quad Q'' = q\sqrt{S_o - t'},$$

где t' — действительная срезка уровня воды в скважине.

Взяв отношение Q'' к Q' , будем иметь:

$$\beta = \frac{Q''}{Q'} = \frac{q\sqrt{S_o - t'}}{q\sqrt{S_o}} = \sqrt{1 - \frac{t'}{S_o}} . \quad (39)$$

Отсюда коэффициент снижения дебита α будет равен:

$$\alpha = 1 - \frac{Q''}{Q'} = 1 - \sqrt{1 - \frac{t'}{S_o}} . \quad (40)$$

Совершенно аналогичным образом для зависимостей, определяемых формулой Смрекера, можно получить что

$$\beta = \sqrt[m]{1 - \frac{t'}{S_o}} \quad \text{и} \quad \alpha = 1 - \sqrt[m]{1 - \frac{t'}{S_o}} . \quad (41)$$

Наконец, если зависимость дебита от понижения будет определяться новой формулой Альтовского, то будем иметь:

$$Q' = a + b \lg S_o \quad \text{и} \quad Q'' = a + b \lg(S_o - t').$$

Перенеся параметр a в левую часть уравнения и взяв отношение $Q'' - a$ к $Q' - a$, получим:

$$\frac{Q'' - a}{Q' - a} = \frac{\lg(S_o - t')}{\lg S_o} . \quad (42)$$

Отсюда дебит скважины с учетом влияния будет равен:

$$Q'' = (Q' - a) \cdot \frac{\lg(S_o - t')}{\lg S_o} + a . \quad (43)$$

Отношение логарифмов $(S_o - t') / S_o$ можно называть логарифмическими коэффициентами влияния.

Формулы (37 — 42) показывают, что коэффициенты влияния и

снижения дебита, а следовательно, и дебит взаимодействующей скважины всегда может быть вычислен, если будет известна величина действительной срезки уровня воды t' , так как величины Q' и S_0 получаются путем непосредственных замеров при одиночных откачках из опытных скважин.

Следовательно, коэффициент снижения дебита может быть определен или опытным путем по данным групповых откачек при пользовании формулами (36) и (37), или по данным одиночных откачек, по которым можно вычислить действительную величину срезки уровня воды t' на основании ряда приведенных ниже формул.

Таким образом для расчета взаимодействующих буровых скважин нужно знать:

а) для каждой скважины в отдельности зависимость дебита от понижения $Q = f(S)$, т. е. уметь по известным формулам определять дебит скважины без учета влияния и б) степень влияния одной скважины на другую, выражаемую отношением $\frac{t_1}{S_0}$, для чего необходимо знать зависимость срезки уровня воды от дебита соседних скважин. Все эти данные можно получить путем производства опытной откачки из каждой скважины в отдельности и наблюдений за понижением уровня воды в соседних скважинах, совершенно не прибегая к производству групповых откачек.

Прежде чем перейти к формулам, посредством которых можно определить величину действительной срезки уровня воды t' и степень влияния одной скважины на другую, определяемую отношением $\frac{t'}{S_0}$, необходимо особо подчеркнуть, что при расчете взаимодействующих скважин имеются две отдельные задачи.

Чаще всего такие скважины используются для целей водоснабжения и искусственного понижения уровня подземных вод, оборудуются однотипными водоподземными механизмами и проектируются с условием создания в них одинаковых или равных по величине понижений.

Этот случай, или эта задача, является основной и наиболее важной в практическом отношении. Поэтому, именно в предположении равенства понижений во взаимодействующих скважинах, выведены все формулы Слихтера, Лейбензона и Мэската.

Реже на практике имеют место случаи, когда взаимодействующие скважины работают с разными понижениями. Например, на заводской площадке могут быть сооружены сначала две скважины, оборудованные центробежными насосами, а через некоторое время, в целях усиления водоснабжения, пробуриваются еще одна или несколько скважин, которые оборудуются эрлифтами. В результате получится группа взаимодействующих скважин, работающих с разной величиной понижений. Естественно, что, при создании в скважинах разных понижений, те из скважин, которые будут иметь большее понижение, будут в большей степени влиять на остальные соседние.

Следовательно, в этом случае степень влияния скважин, выражаемая коэффициентом снижения дебита и коэффициентом влияния будет зависеть, помимо других факторов, главным образом от соотношения понижений, проектируемых или создаваемых в скважинах.

Сначала рассмотрим основную задачу, т. е. предположим, что проектируемые скважины имеют одинаковые по величине понижения. Но, конечно, опытная откачка из скважин может быть проведена как с одинаковыми, так и с разными понижениями, причем предпочтительнее проводить откачки с равными понижениями, так как это создаст наибольшие удобства при расчетах.

Выше неоднократно подчеркивалось, что в формулах, данных для определения коэффициента влияния, t' означает так называемую действительную, а не наблюдавшуюся при одиночных откачках срезку уровня воды. Дело в том, что понижение или срезка уровня воды в соседних наблюдательных скважинах пропорциональна количеству откачиваемой воды из центральной, опытной скважины. Чем больше откачивается воды, тем больше величина срезки. Однако при одновременной откачке вследствие взаимного влияния скважин друг на друга их дебит уменьшается и, следовательно, должна уменьшиться и срезка уровня воды. Величина последней, получающаяся при одновременной откачке с уменьшенными вследствие влияния дебитами, называется действительной в отличие от срезки уровня воды, которая наблюдается при одиночных откачках. Действительную срезку уровня воды при одновременной откачке наблюдать и непосредственно измерять нельзя. Поэтому нужно найти формулы, которые позволили бы вычислять ее по данным одиночных откачек, но для этого предварительно нужно выяснить вид функций, выражающих зависимость срезки уровня воды от величины дебита соседних скважин. Исходя из чисто теоретических предположений, заранее можно сказать, что

а) зависимость между дебитом и срезкой уровня воды всегда может быть выражена одной из существующих формул для кривых дебита;

б) эта зависимость в большинстве случаев будет более простой, чем зависимость дебита от понижения внутри скважины, так как в этом случае исключается влияние сопротивления обсадных труб и фильтров;

в) зависимость между дебитом и срезкой уровня воды большей частью будет прямолинейной, так как в природных условиях движение воды чаще всего подчиняется закону Дарси.

В связи с этим ниже рассмотрим несколько наиболее часто встречающихся на практике случаев зависимостей срезки уровня воды от дебита и, пользуясь ими, найдем ряд формул, позволяющих вычислять величину действительной срезки уровня воды t' , а следовательно, и величину коэффициентов влияния и снижения дебита.

Производя одиночную откачку из скважины 1, мы можем замерять в ней понижение S_1 и срезку уровня воды в скважине 2 — t_2 (рис. 14); при откачке же из скважины 2, наоборот, можем наблюдать в ней понижение, равное S_2 , и срезку уровня воды в скважине 1 — t_1 . Имея эти данные, необходимо найти для скважин 1 и 2 величину действительных срезок уровня воды t' , и t'_2 (рис. 14).

Прежде всего, в ряде практических случаев (например, при расчете водозаборов для водоснабжения) можно принять действительные срезки уровня воды равными наблюдавшимся срезкам при одиночных откачках, т. е. допустить, что $t'_1 = t_1$ и $t'_2 \approx t_2$. В этом случае коэффициент снижения дебита получится преувеличенным, так как $\frac{t_1}{S_2} > \frac{t'_1}{S_2}$ и $\frac{t_2}{S_1} > \frac{t'_2}{S_1}$, а коэффициент влияния преуменьшенным, и соответственно этому дебиты обеих скважин с учетом влияния также получатся преуменьшеными.

Допустим, что срезка уровня воды изменяется пропорционально изменению дебита соседней взаимодействующей скважины, и что срезки в обеих скважинах при опытной откачке равны или будут незначительно по величине отличаться друг от друга. В этом случае можно написать, что действительная срезка уровня воды t'_1 относится к наблюдавшейся срезке t_1 так, как дебит соседней скважины с учетом влияния Q'_2 к дебиту той же скважины без учета влияния Q_2 , т. е.

$$\frac{t'_1}{t_1} = \frac{Q'_2}{Q_2} = \frac{q_2(S_2 - t'_1)}{q_2 S_2} = 1 - \frac{t'_1}{S_2}, \quad (44)$$

откуда

$$t'_1 = t_1 \frac{S_2}{S_2 + t_1}. \quad (45)$$

Если отношение $\frac{S_2}{S_2 + t_1}$ разделить на S_2 и принять $\frac{t_1}{S_2}$ равным x , то получим, что

$$\frac{S_2}{S_2 + 1} = \frac{1}{1 + \frac{t_1}{S_2}} = \frac{1}{1 + x}.$$

Последнее отношение в этом уравнении, как известно, представляет собой сходящийся знакопеременный ряд:

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + \dots$$

Поэтому, приняв во внимание, что

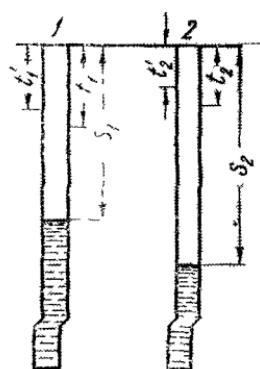


Рис. 14.

$$x = \frac{t_1}{S_2},$$

мы можем написать:

$$\frac{S_2}{S_2 + t_1} = \frac{1}{1+x} = 1 - \frac{t_1}{S_2} + \frac{t_2}{S_2^2} - \frac{t_1^3}{S_2^3}. \quad (46)$$

Отсюда действительная срезка уровня воды t_1^1 будет равна:

$$t_1^1 = t_1 - \frac{t_1^2}{S_2} = -\frac{t_1^3}{S_2^3}. \quad (47)$$

Чтобы при прямолинейной зависимости определить коэффициент влияния согласно формуле (38), нужно действительную срезку уровня воды t_1^1 разделить на S_2 и полученный результат вычесть из единицы. Сделав это, мы получим, что дебит скважины с учетом влияния будет равен:

$$Q'_1 = Q_1 \left(1 - \frac{t_1}{S_2} + \frac{t_1^2}{S_2^2} - \frac{t_1^3}{S_2^3} \dots \right) \beta Q, \quad (48)$$

где t_1 — наблюдавшаяся при одиночной откачке срезка уровня воды в скважине, для которой производится расчет, а S_2 — соответствующее ей наблюдавшееся понижение в соседней влияющей скважине, Q'_1 — дебит скважины с учетом влияния и Q_1 — без учета влияния.

Беря из уравнения (48) один, два или три члена знакопеременного ряда, получим, что преуменьшенный дебит скважины 1 с учетом влияния будет равен:

$$Q'_1 = Q_1 \left(1 - \frac{t_1}{S_2} \right), \quad (49)$$

а преувеличенный

$$Q'_1 = Q_1 \left(1 - \frac{t_1}{S_2} + \frac{t_1^2}{S_2^2} \right). \quad (50)$$

Дебит, близкий к точному, но все же немного преуменьшенный, равняется:

$$Q'_1 = Q_1 \left(1 - \frac{t_1}{S_2} + \frac{t_1^2}{S_2^2} - \frac{t_1^3}{S_2^3} \right). \quad (51)$$

Наконец, согласно уравнению (45), точно дебит будет равен:

$$Q'_1 = Q_1 \left(1 - \frac{t_1}{S_2 + t_1} \right) = Q_1 \frac{S_2}{S_2 + t_1}. \quad (52)$$

Соответственно этому для прямолинейных зависимостей преувеличенный коэффициент снижения дебита первой скважины и преуменьшенный коэффициент влияния будут равны:

$$\alpha_1 = \frac{t_1}{S_2} \text{ и } \beta_1 = 1 - \frac{t_1}{t_2}, \quad (53)$$

преуменьшенный α и преувеличенный β равняются:

$$\alpha_1 = \frac{t_1}{S_2} - \frac{t_1^2}{S_2^2} \quad \text{и} \quad \beta_1 = 1 - \frac{t_1}{S_2} + \frac{t_1^2}{S_2^2}. \quad (54)$$

Преувеличенный α_1 и преуменьшенный β_1 , но близкие к точному, могут быть определены по следующим формулам:

$$\alpha_1 = \frac{t_1}{S_2} - \frac{t_1^2}{S_2^2} - \frac{t_1^3}{S_2^3} \quad \text{и} \quad \beta_1 = 1 - \frac{t_1}{S_2} + \frac{t_1^2}{S_2^2} - \frac{t_1^3}{S_2^3}. \quad (55)$$

Наконец, точно α_1 и β_1 равняются:

$$\alpha_1 = \frac{t_1}{S_2 + t_1} \quad \text{и} \quad \beta_1 = \frac{S_2}{S_2 + t_1}. \quad (56)$$

При этом следует особо подчеркнуть, что величины α_1 и β_1 будут иметь место в скважине 1 при понижении в ней, равном S_2 , т. е. равном понижению соседней скважины.

Соответственно этому можно написать ряд аналогичных формул и для второй скважины.

Для остальных зависимостей, кроме прямолинейной, нужно сначала вычислить действительную величину срезки уровня воды t^1 , а затем подставить ее значение в формулы (40) и (41) и определить дебит взаимодействующих скважин или по формуле:

$$Q'_1 = Q_1(1 - \alpha_1),$$

или по одной из следующих формул:

$$Q'_1 = Q_1 \sqrt{1 - \frac{t'_1}{S_2}}; \quad Q'_1 = Q_1^m \sqrt{1 - \frac{t'_1}{S_2}} \quad \text{и} \quad Q'_1 = (Q_1 - a) \frac{\lg(S_2 - t')}{\lg S_2} + a.$$

Преувеличенное значение срезки t'_1 будет равно t_1 , а преуменьшенное, согласно формуле (47):

$$t'_1 = t_1 - \frac{t_1^2}{S_2} \quad (57)$$

и преувеличенное, но близкое к точному:

$$t'_1 = t_1 - \frac{t_1^2}{S_2} + \frac{t_1^3}{S_2^2}. \quad (58)$$

Наконец, точное значение t'_1 можно найти по формуле (45). Во всех предшествующих формулах вычислялась величина срезки уровня воды t'_1 в первой скважине. Для определения той же величины в другой скважине необходимо в формулах изменить только индексы при t и S . Например, действительная срезка уровня воды во второй скважине, согласно формуле (45), будет равна:

$$t'_2 = t_2 - \frac{S_1}{S_1 + t_2}.$$

По формуле (54) преувеличенное значение коэффициента снижения дебита для второй скважины равно

$$\alpha_2 = \frac{t_2}{S_1} - \frac{t_2^2}{S_1^2} - \frac{t_2^3}{S_1^3}.$$

Теоретически формулы (49–55) не нужны, но практически, поскольку при относительно кратковременных опытных откачках обычно наблюдаются преуменьшенные против действительности срезки уровня воды, все же рекомендуется пользоваться формулами (49) и (53) при расчетах водозаборов, сооружаемых для водоснабжения, а формулами (50) и (54) — для дренажа, временного понижения уровня воды и осушительных мероприятий по горным выработкам. Одновременно следует, конечно, производить параллельные подсчеты и по более точным формулам (52) и (56).

Если при откачках наблюдавшиеся величины срезок уровня воды t_1 и t_2 будут по своей величине резко отличаться друг от друга, что может иметь место при разных S_1 и S_2 , то вместо уравнения (44) нужно применить следующие соотношения:

$$\frac{t_1^1}{t_1} = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{q_2(S_2-t_2^1)}{q_2 S_2} = 1 - \frac{t_2^1}{S_2}. \quad (59)$$

Разница между соотношениями (59) и уравнением (44) заключается в том, что в правой части вместо срезки уровня t_1^1 , ранее принимавшейся равной t_2^1 , поставлена неизвестная нам срезка уровня воды в соседней скважине t_2^1 .

В данном случае мы получали одно уравнение с двумя неизвестными t_1^1 и t_2^1 . Чтобы найти эти величины, нужно составить еще одно аналогичное уравнение для другой скважины 2 (рис. 14):

$$\frac{t_2^1}{t_2} = \frac{Q_2^1}{Q_1} = \frac{q_1(S_1-t_1^1)}{q_1 S_1} = 1 - \frac{t_1^1}{S_1}. \quad (60)$$

Решив совместно уравнения (59) и (60) относительно неизвестных величин t_1^1 и t_2^1 , получим¹:

$$t_2^1 = \frac{t_2 S_2 (S_1 - t_1^1)}{S_1 S_2 - t_1 t_2} \text{ и } t_1^1 = \frac{t_1 S_1 (S_2 - t_2^1)}{S_1 S_2 - t_1 t_2}. \quad (61)$$

Следует предупредить читателя, что обе формулы (61) действительны только для той скважины, которая имеет наименьшее понижение.

Для скважины, имеющей сравнительно большее понижение, вместо двух формул (61) следует пользоваться одной:

$$t_1^1 = \frac{t_1 S_1 (S_2 - t_2^1)}{S_1 S_2 - t_1 t_2}, \quad (62)$$

для которой S_1 должно быть всегда меньше S_2 .

¹ Аналогичные формулы получены А. М. Агаджановым (1) для прямолинейных зависимостей.

Возьмем формулу (52) и найдем, чему равен дебит скважин при расположении их на расстоянии, равном двум радиусам влияния и двум радиусам скважин. В первом случае, очевидно, срезка уровня воды t_1 будет равна нулю, а дебит взаимодействующей скважины—дебиту невзаимодействующей.

Соответственно этому при $t_1=0$ имеем:

$$Q'_1 = Q \left(\frac{S}{S_1 + S_2} \right) = 0,$$

если же скважины будут расположены на расстоянии r , где r —радиус скважины, то t_1 будет равно S_2 . В этом случае будем иметь:

$$S' = Q \left(\frac{S}{(S_1 + S_2)} \right) = 0,5 Q_1,$$

т. е. дебит каждой взаимодействующей скважины будет равен половине дебита скважины невзаимодействующей.

Обратимся к формуле (61). Если скважины будут расположены на расстоянии двух радиусов влияния, то в этом случае t_1 будет равно нулю. Поэтому величина действительной срезки t'_1 , также будет равняться нулю, и, следовательно, дебиты скважин при этих условиях по формуле (61) будут равны друг другу:

$$Q'_2 = Q_2 \text{ и } Q'_1 = Q_1.$$

Если мы будем скважину 2 (рис. 14) постепенно приближать к скважине 1, но с таким расчетом, чтобы понижение в ней S_2 было все время больше S_1 , то при расстоянии, большем двух радиусов скважины, срезка t_1 будет равна S_1 . В этом случае дебит одной из скважин при условии, что $S_2 > t_1 = S_1$, должен равняться нулю, а дебит другой—дебиту невзаимодействующей скважины. При $t_1 = S_1$ по формуле (61) срезка уровня воды будет равна S_1 и, следовательно, скважина 1 перестанет давать воду. При том же условии по формуле (61) срезка уровня воды t'_2 получается равной нулю. Отсюда дебит скважины 2 будет равняться дебиту невзаимодействующей скважины. Таким образом формулой (61) имеет смысл пользоваться только при расстоянии между скважинами, большем чем то, при котором получается $t_1 = S_1$.

При выводе формул для определения срезки уровня воды до сих пор мы предполагали прямолинейную зависимость между дебитом и понижением в данной скважине и дебитом и срезкой уровня воды в соседней скважине, т. е. имели дело со следующими четырьмя зависимостями:

$$Q_1 = q_1 S_1; Q_1 = q'_1 t_2; Q_2 = q_2 S_2 \text{ и } Q_2 = q''_2 t_1,$$

где q_1 и q_2 означают удельные дебиты скважин 1 и 2, а q'_1 и q''_2 так называемые удельные дебиты по срезкам.

Допустим, что мы имеем дело со степенной зависимостью

типа формулы Краснопольского. В этом случае четыре интересующие нас зависимости будут иметь следующий вид:

$$Q_1 = q_1 \sqrt{S_1}; \quad Q_2 = q_2 \sqrt{S_2}; \quad Q_1 = q_x \sqrt{t_2} \quad \text{и} \quad Q = q'' \sqrt{t_1}.$$

Пользуясь этими четырьмя формулами, напишем соотношения, аналогичные формулам (44), (59) и (60):

$$\frac{\sqrt{t_1}}{\sqrt{t_1}} = \frac{Q_2}{Q_2} = -\frac{q_2}{q_2} \frac{\sqrt{S_1 - t_2}}{\sqrt{S_2}},$$

$$\frac{\sqrt{t_1}}{\sqrt{t_1}} = \frac{Q'_2}{Q_2} = \frac{q_2 \sqrt{S_2 - t_2}}{q_2 \sqrt{S_2}} \quad \text{и} \quad \frac{\sqrt{t_2}}{\sqrt{t_2}} = \frac{Q'_1}{Q_1} = \frac{q \sqrt{S_1 - t_1}}{q_1 \sqrt{S_1}}$$

Возвысив в квадрат правые и левые части приведенных только что уравнений, получаем, что

$$\frac{t_1}{t_1} = 1 - \frac{t_1^1}{S_2}; \quad \frac{t_1^1}{t_1} = 1 - \frac{t_2^1}{S_2} \quad \text{и} \quad \frac{t_2^1}{t_2} = 1 - \frac{t_1^1}{S_1}$$

В результате мы имеем уравнения, аналогичные формулам (44), (59) и (60). Следовательно, все выведенные ранее формулы для прямолинейной зависимости являются действительными и для степенной зависимости типа формул Краснопольского.

Совершенно аналогичным образом можно доказать, что формулы, полученные для расчета взаимодействующих скважин и определения действительной величины срезки уровня воды останутся в силе и для зависимостей типа формулы Смрекера. Наконец, если предположить, что при понижениях свыше 1 м. логарифмы срезок уровня воды будут прямо пропорциональными дебитам, то и в этом случае снова получим формулы (44), (50) и (60). Например, напишем соотношения, аналогичные приведенным в формуле (44):

$$\frac{b_1 \lg t_1^1}{b_1 \lg t_1} = \frac{Q_2^1}{Q_2} = \frac{b_2 \lg (S_2 - t_1^1)}{b_2 \lg S_2}; \quad \frac{t_1^1}{t_1} = 1 - \frac{t_1^1}{S_2}.$$

Следовательно, во всех случаях, когда зависимость дебита от понижения в данной скважине и зависимость срезки уровня воды от дебита соседней скважины выражаются одними и тем же функциями (прямолинейной или степенной), то действительная срезка уровня воды может быть определена согласно выведенным выше формулам (45), (57), (58) и (61).

Рассмотренными выше зависимостями дебита от понижения и от срезки уровня воды исчерпывается большинство встречающихся на практике случаев. Однако иногда могут быть такие случаи, когда зависимость дебита от понижения в данной скважине будет выражаться одной функцией, а зависимость дебита от срезки уровня воды в соседней скважине — другой. Например, допустим, что $Q_2 = q \sqrt{S_2}$, а зависимость Q_2 от срезки

уровня воды в соседней скважине является прямолинейной, т. е. $Q_2 = q''_2 t_1$. В этом случае аналогично формуле (44) можно написать, что

$$\frac{t_1^1}{t_1} = \frac{Q_2}{Q_2} = \frac{q_2 \sqrt{S_2 - t_1^1}}{q_2 \sqrt{S_2}} = \sqrt{1 - \frac{t_1^1}{S_2}} \quad (63)$$

Возвысив уравнение (63) в квадрат и сделав соответствующие преобразования, мы получим следующее квадратное уравнение с одним неизвестным;

$$S_2(t_1^1)^2 + t_1^2 - t_1^1 - t_1^2 S_2 = 0.$$

Решив его относительно неизвестной величины t_1^1 , получим:

$$t_1^1 = \frac{-t_1^2 + t_1 \sqrt{t_1^2 \pm 4S_2^2}}{2S_2}. \quad (64)$$

В правой части уравнения (64) перед корнем следует поставить знак плюс, так как срезка уровня воды всегда является величиной положительной. Наконец, чтобы определить коэффициент влияния, нужно величину действительной срезки уровня воды поделить на понижение в соседней скважине S_2 и частное вычесть из единицы. Сделав это, получим, что дебит взаимодействующей скважины будет равен:

$$Q'_1 = Q_1 \left(1 + \frac{t_1^2 - t_1 \sqrt{t_1^2 + 4S_2^2}}{2S_2^2} \right). \quad (65)$$

Если расстояние между скважинами примем равным одному радиусу влияния, то t_1 будет равно нулю, а дебит взаимодействующей скважины по формуле (65) при этих условиях будет равен дебиту невзаимодействующей, т. е. $Q'_1 = Q_1$: если же скважины будут расположены рядом, то t_1 будет равно S_2 . В этом случае, подставив в формулу (65) вместо S_2 равную ей величину t_1 , будем иметь:

$$Q'_1 = 0,38 Q_1. \quad (66)$$

Как видно из формулы (66), в данном случае полного совпадения с теоретическими предпосылками о величине коэффициента влияния, равного 0,5, при расположении скважин на расстоянии двух их радиусов, не получается. Отсюда следует, что при близких расстояниях скважин друг к другу дебит взаимодействующей скважины по формуле (65) будет получаться преуменьшенным.

Теоретически возможен целый ряд комбинаций между зависимостями дебита от понижения и дебита от срезки уровня воды, причем полученные формулы могут охватить громадное большинство встречающихся на практике случаев, и потому ими вполне можно ограничиться, полагая, что для более редко

встречающихся случаев всегда можно найти соответствующие решения. Некоторые из теоретически возможных случаев следует считать вообще нереальными; к ним, например, относятся случаи, когда зависимость дебита от понижения внутри скважин прямолинейная, а зависимость срезки уровня воды — степенная или параболическая.

Перейдем теперь ко второй задаче о взаимодействующих скважинах, т. е. предположим, что они будут иметь при эксплоатации разные понижения.

Заранее можно сказать, что чем скважина будет иметь меньшее понижение, т. е. чем меньше из нее будет откачиваться воды, тем меньше она будет влиять на соседние скважины. Наоборот, скважины, имеющие наибольшее понижение будут иметь наименьшее влияние от соседних скважин. Таким образом в случае разных понижений степень влияния или коэффициент снижения дебита будут обратно пропорциональными количествам откачиваемой воды или проектируемым в скважинах понижениям.

Величину коэффициента снижения дебита для разных понижений можно определить, пользуясь следующими соотношениями:

$$\alpha'_1 = \alpha_1 \frac{S_2}{S_1} \text{ или } \alpha_1 = \alpha'_1 \frac{S_1}{S_2}, \quad (67)$$

где α'_1 — коэффициент снижения дебита для случая разных понижений, α_1 — коэффициент снижения дебита при равных понижениях, определенный по ранее данным формулам, и S_2 и S_1 — разные по величине понижения в соседних скважинах.

При взаимодействии многих скважин с разными понижениями введение поправок на разность запроектированных понижений в них будет указано ниже.

Рассмотрим теперь вопрос о зависимости коэффициентов влияния и снижения дебита от величины понижения.

По данным опытных откачек мы можем вычислить коэффициенты влияния и снижения дебита, действительные только для понижений, созданных при опытной откачке. Поэтому, естественно, возникает вопрос о том, как будут изменяться и будут ли вообще изменяться величины коэффициентов влияния и снижения дебита при увеличении понижения. Этот вопрос весьма важен потому, что опытные откачки производятся с небольшими понижениями, а расчет эксплоатационных скважин ведется для значительно больших понижений. Ниже мы дадим только общие выводы по этому вопросу, доказательства которых приведены в работе автора (7), где высказаны следующие положения, которые действительны только для случая равенства понижений во взаимодействующих скважинах:

а) величина коэффициентов влияния и снижения дебита при условии равенства понижений во взаимодействующих скважинах не зависит от величины понижения для прямолинейных и степенных зависимостей при условии, что функции, выражющие зависимость дебита от понижения и от срезки уровня воды в сосед-

них скважинах, отличаются друг от друга только постоянными коэффициентами;

б) в остальных случаях по мере увеличения понижения коэффициент влияния увеличивается, а коэффициент снижения дебита уменьшается, но так как эти изменения относительно невелики при обычно создаваемых в скважинах понижениях, то ими при практических расчетах можно пренебречь¹ и, наконец,

в) если при больших понижениях изменения этих коэффициентов будут довольно значительны, то их величины всегда можно вычислить, пользуясь функциями $z=f(s)$ и $z-f(s)$, которые можно определить по данным опытных откачек, проведенных не менее чем с тремя понижениями.

Эти положения вполне приемлемы и с практической стороны, так как, приняв величины коэффициентов влияния и снижения дебита постоянными, мы при расчетах, производимых для водоснабжения, будем получать несколько преуменьшенный дебит взаимодействующих скважин, что, конечно, для указанных целей является необходимым. Что касается различного рода водопонизительных установок, то незначительное увеличение коэффициента влияния, а соответственно и дебита, не имеет существенного практического значения, так как насосное оборудование в данном случае устанавливается со значительными резервами.

В случае разных понижений во взаимодействующих скважинах, как указано было выше, коэффициенты снижения дебита обратно пропорциональны понижениям и, следовательно, величина их, главным образом, определяется соотношением понижений в скважинах.

Нам остается еще рассмотреть вопрос о влиянии конструкции скважин на коэффициенты влияния и снижения дебита. По сути дела этот вопрос в основном сводится к влиянию диаметра скважин на интересующие нас величины, так как сопротивления, возникающие при движении воды в трубах и фильтрах, учитываются величиной параметров и видом функции $Q = f(S)$.

В отношении влияния диаметра скважины на величину интересующих нас коэффициентов сказать в настоящее время что-либо определенное очень трудно, так как нам неизвестна точная зависимость дебита одиночных скважин от величины их диаметра. Если принять во внимание утверждение ряда исследователей, что диаметр весьма незначительно влияет на дебит скважин, то практически он не должен сколько-нибудь существенно влиять и на коэффициент влияния и снижения дебита.

Если согласиться с противоположной точкой зрения относительно влияния диаметра на дебит скважин, то величина интересующих нас коэффициентов должна соответственно изменяться. При этом пропорционально увеличению дебита нужно увеличивать срезку уровня воды, что повлечет за собой увеличение коэфи-

¹ Два приведенные выше положения подтверждаются также довольно большим числом опытных (лабораторных и полевых) данных, изложенных в работе М. Е. Альтовского „Взаимодействие скважин“, 1941.

циента снижения дебита или уменьшение коэффициента влияния. Таким образом увеличение диаметра и увеличение срезки уровня воды в отношении определения дебита как бы компенсируют друг друга. В общем весь этот вопрос нуждается, конечно, в специальных исследованиях. Практически это затруднение решают таким образом: так как конечный диаметр и диаметр фильтров эксплоатационных и опытных скважин обычно мало отличаются друг от друга, то влиянием этого фактора на величину коэффициентов влияния и снижения дебита пренебрегают. При проектировании водозаборных сооружений для водоснабжения диаметры эксплоатационных скважин часто принимают несколько большими, чем диаметры опытных скважин; поэтому связанное с этим некоторое увеличение количества воды может отразиться только в благоприятную сторону. Вообще же в опытных скважинах фильтры следует устанавливать тех же типов и примерно тех же диаметров. Это вызывается не только соображениями, вытекающими из гидрогеологических расчетов, но и тем, что при гидрогеологических изысканиях испытывать проектируемые типы и диаметры фильтров обычно приходится в полевых условиях.

Выше было указано, что коэффициент влияния зависит от числа и расстояния между скважинами. Определенное на основании опытных откачек по тем или иным формулам значение α или β , конечно, является действительным только для того расстояния, на котором были расположены опытные скважины. Естественно, что чем больше расстояние между взаимодействующими скважинами, тем должен быть больше коэффициент влияния, и наоборот. Следовательно, для случая взаимодействия многих скважин мы должны уметь вычислять величину коэффициентов влияния и снижения дебита в зависимости от расстояния между скважинами. Кроме того, зная эти величины для скважин, расположенных на различных расстояниях друг от друга, необходимо каким-то образом выразить результат или степень взаимного влияния многих скважин. Последнее наиболее естественно и удобно выразить посредством суммарных коэффициентов влияния $\Sigma\beta$ и снижения дебита $\Sigma\alpha$. Под первым коэффициентом мы будем понимать отношение дебита взаимодействующей скважины при одновременном влиянии многих скважин к дебиту невзаимодействующей скважины Q_1 , т. е. отношение

$$\Sigma\beta = \frac{Q_n}{Q_1}. \quad (68)$$

Допустим, что мы имеем n взаимодействующих скважин. Обозначим дебит невзаимодействующей скважины через Q_1 , дебит той же скважины и при той же величине понижения, но при взаимодействии двух скважин — Q_2 , при взаимодействии трех скважин — через Q_3 и т. д. и, наконец, при взаимодействии n скважин через Q_n . Тогда результат взаимодействия двух

скважин можно выразить отношением $\frac{Q_2}{Q_1}$, дополнительный результат одновременного взаимодействия третьей скважины через отношение $\frac{Q_2}{Q_3}$, а результат одновременного взаимодействия трех скважин — через отношение $\frac{Q_3}{Q_1}$, равное по определению суммарному коэффициенту влияния $\Sigma\beta$.

$$\Sigma\beta = \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot \frac{Q_3}{Q_2}. \quad (69)$$

Аналогичным образом для случая взаимодействия многих скважин можно написать:

$$\Sigma\beta = \frac{Q_n - Q_2}{Q_1} \cdot \frac{Q_2 - Q_3}{Q_2} \cdots \frac{Q_n}{Q_{n-1}}. \quad (70)$$

Отсюда получается следующее важное положение: приближенно суммарный коэффициент влияния равен произведению отдельных коэффициентов влияния:

$$\Sigma\beta \approx \beta_1 \cdot \beta_2 \cdots \beta_n. \quad (71)$$

Если допустить, что суммарный коэффициент влияния при очень близком расположении и при весьма небольшом числе скважин не может быть больше единицы, деленной на число скважин

$$\Sigma\beta \geq \frac{1}{n}, \quad (72)$$

то коэффициент влияния каждой скважины в отдельности при этом расположении будет приближенно равен:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt[n]{n}}. \quad (73)$$

Уравнения (72) и (73) можно считать справедливыми только при очень небольшом числе взаимодействующих скважин, так как уже при трех скважинах, согласно формуле (73), $\Sigma\beta$ получается равным 0,71. Отсюда следует, что при взаимодействии многих скважин (более 4-5) формулу (72) нельзя считать справедливой, так как суммарный дебит многих взаимодействующих скважин, хотя бы и очень сближенных, очевидно, будет значительно больше, чем дебит одной невзаимодействующей скважины.

С физической стороны это вполне понятно, так как несколько расположенных близко друг к другу взаимодействующих скважин образуют шахтный колодец большого диаметра, дебит которого заведомо будет значительно больше дебита одной невзаимодействующей скважины.

Кроме того, здесь нужно обратить внимание на исследования Зихардта (10), указывающие на особые условия притока воды к скважинам при очень близком расположении их друг к другу. Он

отмечает, что при близком расположении колодцев, образующих замкнутый контур, приток воды в них с внутренней стороны этого контура будет минимальным и с внешней максимальным. По теоретическим исследованиям Зихардга для нормальной работы взаимодействующих скважин минимальное расстояние между ними l должно быть равно или больше 16 диаметров скважин:

$$l \geq 16d.$$

Все эти соображения указывают, что и формулу (71) следует рассматривать как приближенную, причем погрешность вычисления при очень близком расположении многих взаимодействующих скважин может быть настолько велика, что практически будет превосходить допустимые пределы. Однако столь близкое расположение скважин имеет лишь теоретический интерес, так как ни в одном практическом случае взаимодействующие скважины не располагаются столь близко одна к другой.

Если скважины будут расположены вне влияния, то для каждой из них в отдельности α будет равна единице: следовательно, согласно формуле (71) и суммарный коэффициент влияния также будет равен единице.

Дадим суммарному коэффициенту снижения дебита несколько иное определение, исходя при этом из других соображений, чем, те, которые имели место при определении суммарного коэффициента влияния.

Под суммарным коэффициентом снижения дебита α будем понимать сумму отдельных коэффициентов снижения дебита. На основании этого определения можно написать:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n. \quad (74)$$

Данное нами определение суммарного коэффициента снижения дебита можно подкрепить такими соображениями. Если движение подземных вод подчиняется закону Дарси, то, в результате взаимодействия многих скважин, в любой из них статический уровень воды окажется уменьшенным на какую-то величину, которую, естественно, можно назвать суммарной срезкой уровня воды t' . Но если так, то и суммарный коэффициент снижения дебита, по аналогии с двумя взаимодействующими скважинами, можно выразить через отношение суммарной срезки к понижению:

$$\alpha = \frac{t'}{S}. \quad (75)$$

Но суммарная срезка уровня воды в случае движения подземных вод по закону Дарси, как это будет видно из дальнейшего, равна сумме срезок уровня. Отсюда получается формула (74), написанная на основании определения суммарного коэффициента снижения дебита:

$$\alpha = \frac{t'}{S} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{S} = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_n. \quad (76)$$

При рассмотрении влияния двух скважин было указано, что коэффициент влияния равен единице минус коэффициент снижения дебита. Отсюда можно было бы суммарный коэффициент снижения дебита определить как разность между единицей и суммарным коэффициентом влияния, т. е. полагать, что

$$\Sigma \alpha = 1 - \Sigma \beta. \quad (77)$$

Последнее уравнение не дает нам, однако, ничего существенного как в теоретическом, так и в практическом отношении. В этом случае, прежде чем найти $\Sigma \alpha$, нужно вычислить $\Sigma \beta$, но так как величина последней по формуле (71) определяется приближенно, то и величина $\Sigma \alpha$ также будет приближенной. Следовательно, в отношении точности решения интересующей нас задачи мы не получаем ничего нового, в практическом же отношении при определении суммарного коэффициента снижения дебита по формуле (77) получились бы ненужные дополнительные пересчеты.

Определение $\Sigma \alpha$ по формуле (74), как это показано ниже, имеет то преимущество, что благодаря ему мы сможем подсчитывать дебит скважины с некоторым, хотя и незначительным, преуменьшением; это имеет весьма существенное практическое значение во всех случаях, когда вода рассматривается как жидкое полезное ископаемое. Возьмем случай трех взаимодействующих скважин. Для них суммарный коэффициент влияния по формуле (74) равен:

$$\Sigma \beta = \beta_1 \beta_2. \quad (78)$$

Учитывая, что $\beta_1 = 1 - \alpha_1$ и $\beta_2 = 1 - \alpha_2$ можно уравнение (78) переписать следующим образом:

$$\Sigma \beta = \beta_1 \beta_2 = (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) = [(1 - \alpha_1) - (\alpha_1 \alpha_2)] = [(1 - \Sigma \alpha) + \alpha_1 \alpha_2]. \quad (79)$$

Из уравнения (79) видно, что $\Sigma \beta$ больше $(1 - \Sigma \alpha)$, правда, на очень незначительную величину, так как произведение $\alpha_1 \alpha_2$ обычно очень невелико. Например, даже при α_1 и α_2 , равных 0,3, их произведение будет равно 0,09. Все это, конечно, легко распространяется и на случай многих скважин. Формулу (76) можно было бы считать вполне справедливой, если бы в числителе стояла сумма действительных срезок уровня воды, т. е. тех срезок, которые получаются при уменьшенных дебитах и взаимодействии многих скважин. Это условие может быть выполнено, так как, зная величину действительной срезки уровня воды для двух скважин, расположенных на определенном расстоянии друг от друга, по формулам, приведенным ниже, можно найти ее величину и для других расстояний. Однако к решению этого вопроса можно подойти и несколько иначе.

Пользуясь пропорциональностью между расходом, величиной срезки и коэффициентом снижения дебита, можно принять по ана-

логии с взаимодействием двух скважин—формула (56), что действительная величина суммарного коэффициента снижения дебита и суммарного коэффициента влияния будут равны:

$$\Sigma \alpha = \frac{\Sigma t_1}{S + \Sigma t_1} \text{ и } \Sigma \beta = \frac{S}{S - \Sigma t_1},$$

где S —расчетная величина понижения и Σt^1 —сумма срезок уровня воды, получаемая путем следующих подсчетов. При взаимодействии двух скважин и при производстве из них одиночных откачек нам на основании наблюдений известна величина срезки уровня воды для расстояния, на котором расположены опытные скважины. Затем срезку следует увеличить пропорционально увеличению проектируемого понижения и, наконец, пользуясь формулой (80), можно вычислить величину срезки уровня для любых других расстояний между скважинами. Сложив для каждой скважины в отдельности все срезки уровня, получающиеся от всех взаимодействующих скважин, можно также вычислить и суммарный коэффициент снижения дебита, равный $\frac{\Sigma t_1}{S + t_1}$.

По разъяснению проф. Н. К. Гиринского суммарный коэффициент снижения дебита, определенный по формуле (79), будет в точности соответствовать этой величине по теории взаимодействующих скважин Мэската.

Перейдем к вычислению коэффициентов влияния и снижения дебитов для различных расстояний между скважинами. По данным опытных откачек нам обычно известна величина α для расстояния x , на котором были расположены опытные скважины. Допустим, что мы имеем дело с артезианским потоком; тогда, по формуле Дюпюи, дебит артезианской скважины при понижении t_1 на расстоянии x_1 будет равен:

$$Q = 2\pi K M \frac{t_1}{\ln R/x_1}.$$

Для какого-то другого расстояния— x_2 и понижения t_2 —та же величина дебита будет выражаться следующим уравнением:

$$Q = 2\pi K M \frac{t_2}{\ln R/x_2},$$

где t_2 —понижение на расстоянии x_2 . Приравняв два последних уравнения одно к другому, мы будем иметь:

$$\frac{t_1}{\ln R/x_1} = -\frac{t_2}{\ln R/x_2}, \text{ или } \frac{t_1}{\lg R/x_1} = -\frac{t_2}{\lg R/x_2},$$

откуда

$$\frac{t_1}{t_2} = -\frac{\lg R/x_1}{\lg R/x_2}.$$

А так как коэффициент снижения дебита прямо пропорционален срезке уровня воды

$$\frac{a_2}{a_1} = -\frac{t_2}{S} : \frac{t_1}{S} = -\frac{t_2}{t_1},$$

$$\text{то } \frac{a_1}{a_2} = \frac{t_1}{t_2} = -\frac{\lg R/x_1}{\lg R/x_2}, \quad \text{или } a_2 = a_1 \frac{\lg R/x_2}{\lg R/x_1}. \quad (81)$$

Напишем теперь два аналогичных уравнения для грунтового колодца при расстояниях x_1 и x_2 при соответствующих понижениях t_1 и t_2 .

$$Q = \frac{\pi K (2H - t_1)t_1}{\ln R/x_1} \quad \text{и} \quad Q = \frac{\pi K (2H - t_2)t_2}{\ln R/x_2}.$$

Приравняв эти уравнения, будем иметь:

$$\frac{2Ht_1 - t_1^2}{\ln R/x_1} = \frac{2Ht_2 - t_2^2}{\ln R/x_2},$$

откуда

$$2Ht_2 - t_2^2 = (2Ht_1 - t_1^2) - \frac{\ln R/x_2}{\ln R/x_1}. \quad (82)$$

Выше было сказано, что величина срезки уровня воды пропорциональна коэффициенту снижения дебита, поэтому уравнение (82) мы можем написать так:

$$2Ha_2 - a_2^2 = (2Ha_1 - a_1^2) - \frac{\lg R/x_2}{\lg R/x_1} \quad (83)$$

Так как в правой части уравнения (83) находятся величины известные и для данного расстояния между скважинами постоянные, то, приравняв эту часть уравнения постоянной величине A и решив квадратное уравнение относительно неизвестной величины a_2 , получим:

$$a_2 = H - \sqrt{H^2 - A}, \quad (84)$$

где

$$A = (2Ha_1 - a_1^2) - \frac{\lg R/x_2}{\lg R/x_1}.$$

Кроме того, следует отметить, что коэффициент снижения дебита α (уравнение 83) при расстояниях, на которых на практике сооружаются скважины, обычно бывает значительно меньше 0,5. Поэтому иногда величиной a_1^2 и соответственно величиной a_2^2 можно пренебречь. При этом условии уравнение (83) перейдет в уравнение (81). Следовательно, формулой

$$a_2 = a_1 - \frac{\lg R/x_2}{\lg R/x_1}$$

можно пользоваться, как упрощенной, и для расчета коэффициента снижения дебита грунтовых колодцев.

Таким образом формулы (81 и 84) дают нам возможность, зная коэффициент снижения дебита, установленный опытным путем для какого-то определенного расстояния, приблизенно подсчитать его величину для любого интересующего нас расстояния. Конечно, эти подсчеты следует производить для расстояний, меньших R , так как на расстояниях, больших R , коэффициент снижения дебита должен равняться нулю. Если же величина радиуса влияния неизвестна, то подсчеты коэффициента снижения дебита практически следуют вести только для расстояний меньших тех, при которых величина коэффициента снижения дебита получается больше 0,5–1,0 %.

Коэффициент влияния для различных расстояний между скважинами может быть определен по формулам:

$$\beta_2 = \left(1 - \frac{t_2}{s}\right); \quad \beta_2 = \sqrt{1 - \frac{t_2}{s}} \quad \text{и} \quad \beta_2 = \sqrt[m]{1 - \frac{t_2}{s}} \quad (85)$$

для которых величина t_2 вычисляется по формуле (81). Или, проще, при пользовании основным соотношением между коэффициентами влияния и снижения дебита β_2 будет равна $1 - \alpha_2$.

Формулы, выведенные для суммарных коэффициентов снижения дебита и влияния, а также для определения этих коэффициентов при различных расстояниях между скважинами, дают нам возможность рассчитать почти любую комбинацию многих взаимодействующих скважин, причем их суммарный дебит, в зависимости от производственного назначения данной системы взаимодействующих скважин, может быть подсчитан преуменьшенным или преувеличеным.

В случае взаимодействия многих скважин, работающих с разными понижениями, коэффициент снижения дебита, подсчитанный для равных понижений и определенного расстояния между скважинами, очевидно, необходимо, с одной стороны, умножить на коэффициент, представляющий собой частное от деления понижения в какой-либо соседней влияющей скважине на понижение в данной и, с другой стороны,—умножить на поправочный коэффициент для разных расстояний согласно формуле (81).

При этом, естественно, нужно принимать во внимание только те скважины, которые находятся от данной на расстояниях, меньших одного радиуса влияния. Исправленные коэффициенты снижения дебита с учетом разных понижений и разных расстояний следует затем сложить и таким образом определить суммарный коэффициент снижения дебита.

Все это можно написать в виде такой формулы:

$$\Sigma\alpha_i = \alpha_o \left(\frac{S_2}{S_1} - \frac{S_3}{S_1} \frac{\lg R/x_2}{\lg R/x_1} \dots \frac{S_{n-1}}{S_1} \frac{-x_{n-2}}{\lg R/x_1} \right), \quad (86)$$

где $\Sigma\alpha_i$ —суммарный коэффициент снижения дебита для данной скважины, α_o —коэффициент снижения дебита, подсчитанный по

данным опытной откачки для равных понижений и при определенном расстоянии x_1 между скважинами; $\frac{S_2}{S_1}, \frac{S_1}{S_2} \dots$ поправки на разные понижения в скважинах и $\frac{\lg R/x_2}{\lg R/x_1} \dots$ поправки на разные расстояния между скважинами. Очевидно, поправку на разные расстояния между первой парой скважин вводить не следует.

В случае разных понижений для некоторых скважин суммарный коэффициент снижения дебита может оказаться равным 100% и более. Это будет означать, что при заданных соотношениях понижений суммарная срезка уровня воды равна или даже больше запроектированного понижения в данной скважине. естественно, что при этом условии скважина перестанет работать.

Если зависимость между дебитом и понижением будет квадратичной или будет определяться формулой Смрекера, то из поправок на разные понижения нужно соответственно извлечь квадратный корень или корень степени t . При этом поправки на разные расстояния между скважинами, учитывая, что по формуле Краснопольского произведения срезок на расстояния между скважинами являются величиной постоянной

$$t_1 x_1 = t_2 x_2 = C,$$

мы можем считать обратно пропорциональными расстояниям между скважинами.

В связи с этим формулу (86) для квадратичной зависимости можно написать следующим образом:

$$\Delta z_i = z_o \left(\sqrt{\frac{S_2}{S_1}} + \sqrt{\frac{S_3}{S_2}} \cdot \frac{x_1}{x_2} + \sqrt{\frac{S_{n-1}}{S_1}} \cdot \frac{x_1}{x_{n-1}} \right), \quad (87)$$

где Δz_i , z_o , S_1, S_2 имеют прежние обозначения, x_1 —расстояние между двумя соседними скважинами и x_2, x_{n-1} —расстояния данной скважины от всех следующих. Для зависимости Смрекера поправку на разные расстояния без больших погрешностей можно определять так же, как и для квадратичной зависимости.

Заканчивая рассмотрение взаимодействия многих скважин, нужно сказать, что, при очень близком расположении скважин друг от друга, результаты подсчетов могут получиться значительно преуменьшенными по сравнению с действительными.

ГЛАВА III

РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ АРТЕЗИАНСКИХ СКВАЖИН

1. Общие положения

§ 1. Все излагаемые в настоящем руководстве методы и формулы расчета взаимодействующих скважин применимы только в условиях установившегося движения подземных вод. При откачке воды из резервуаров или бассейнов подземных вод, не имеющих естественного пополнения через области питания, все приводимые ниже формулы и методы дают только дебит скважин в начальный момент, при дальнейшей же откачке дебиты скважин будут являться функцией не только понижений, но и времени.

§ 2. Все формулы и методы применимы в условиях, когда движение подземных вод подчиняется закону Дарси; следовательно, зависимость между дебитом и понижением в артезианских скважинах является прямолинейной, а в грунтовых колодцах — параболической (формулы Форхгеймера).

§ 3. Разработанные автором настоящей работы методы расчета взаимодействующих артезианских скважин для непрямолинейных зависимостей дебита от понижения нельзя считать безусловно доказанными, и потому применять их для непрямолинейных зависимостей рекомендуется только в экспериментальном порядке.

§ 4. По существующим методам расчета, за исключением метода Альтовского, определяется уровень воды у внешней стенки скважин; поэтому для грунтовых колодцев при подсчете необходимо учитывать величину разрыва или „прыжка“ уровней, а для артезианских скважин — потерю напора на сопротивление обсадных труб и фильтров.

§ 5. Определенное по расчету взаимодействующих скважин понижение при проектировании глубины загрузки насосных установок необходимо увеличивать на амплитуду режимных колебаний уровня воды в годовом и многолетнем разрезе, а также учитывать возможное частичное истощение водоносного слоя и неизбежные погрешности, связанные с производством гидрогео-

логических изысканий и расчетов. Величина указанных выше поправок, необходимых для определения эксплоатационного динамического уровня воды в скважинах, берется из данных режимных наблюдений, а также на основании производственного опыта специалистов.

§ 6. Так как дебит как взаимодействующих, так и одиночных скважин прямо пропорционален коэффициенту фильтрации, то точность подсчетов прежде всего зависит от точности определения этой величины. Поэтому только для различного рода предварительных подсчетов допустимо величину коэффициента фильтрации определять лабораторными методами, а тем более данными механических анализов. Для всех расчетов, требующих достаточной точности, величину коэффициента фильтрации нужно устанавливать по данным опытных откачек¹.

§ 7. Особенно серьезное внимание при производстве расчетов взаимодействующих скважин следует обращать на определение или выбор величины R — радиуса влияния. Во всех случаях когда по гидрогеологическим условиям имеются основания полагать, что влияние данной группы скважин с течением времени дойдет до области питания, необходимо за величину R принимать расстояние от центра данной группы скважин до области питания водоносного горизонта.

Если области питания значительно удалены от скважин, и гидрогеологические условия позволяют считать, что радиус влияния их будет значительно меньше расстояния до области питания, то его величину следует определять или опытным путем по колебанию уровня воды в наблюдательных скважинах, или путем продолжения (графически или аналитически) кривой депрессии, полученной при опытных откачках, до пересечения ее с непониженным уровнем подземных вод.

Во всех случаях нужно иметь в виду, что при расчетах для целей водоснабжения нельзя преуменьшать, а для искусственного понижения уровня подземных вод — преувеличивать величину радиуса влияния.

§ 8. Все формулы и способы расчета взаимодействующих скважин не являются методами определения запасов подземных вод и для этой цели могут быть использованы только как косвенные показатели.

§ 9. Так как формулы Слихтера, Лейбензона, Мэската, Щелачева и Форхгеймера для артезианских скважин дают при подсчетах практически один и тот же результат, то допустимо пользоваться любыми из них.

В настоящем руководстве приведено сравнительно большое количество формул Мэската только потому, что они наиболее просты и совершенно не встречаются в массовой гидрогеологической литературе.

¹ Так как правильное проведение опытных откачек имеет очень важное значение для производства расчетов, то в отдельном приложении приведены рекомендуемые автором нормативные данные для их производства.

2 Малые группы скважин

§ 10. Под малыми группами понимается небольшое количество (обычно не более 10—15) взаимодействующих скважин, расположенных на относительно небольшом участке по сравнению со всей площадью распространения водоносного слоя. Расстояние от малой группы скважин до областей питания водоносного горизонта в сотни и тысячи раз больше расстояний между скважинами, составляющими данную малую группу. К этому типу можно отнести все небольшие группы скважин, эксплуатирующие подземные воды крупнейших артезианских бассейнов СССР.

§ 11. Малые группы скважин различаются между собой прежде всего по числу их, входящих в данную группу, по размещению их в плане и по форме окружающего их контура области питания. Такие группы скважин располагаются в плане любым образом, а предложенные для их расчета формулы учитывают только размещение их по формам правильных геометрических фигур (треугольник, квадрат, круг и т. д.).

Контур области питания малых групп может быть прямолинейным (например река, за счет которой питается гидравлически связанный с ней водоносный горизонт), круговым или каким-либо другим близким ему по форме (артезианские воды при мульдообразном залегании слоев).

§ 12. Малые группы взаимодействующих скважин могут применяться для водоснабжения, для извлечения в небольшом количестве жидких полезных ископаемых (минеральные воды и рассолы) и для снижения напора артезианских вод при проходке подготовительных горных выработок.

§ 13. При выборе формул для расчета малых групп скважин необходимо руководствоваться следующими соображениями:

а) число скважин в данной группе должно точно соответствовать числу скважин, для которых выведена данная формула;

б) в плане скважины должны быть достаточно точно расположены в соответствии с той геометрической фигурой, форма которой учитывалась при выводе данной формулы; здесь, однако, допустимы некоторые небольшие отклонения; например, если скважины не совсем точно размещены по вершинам равностороннего треугольника, то все же для расчета допустимо за длину стороны треугольника принимать среднее расстояние между скважинами;

в) желательно, чтобы форма контура питания соответствовала той, которая указана для той или иной формулы.

§ 14. Для двух скважин при круговой или близкой к ней форме контура питания можно применять простейшую формулу, предложенную Мэскатом:

$$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^2}{2ar}} , \quad (88)$$

где Q — дебит одной из взаимодействующих скважин K — коэффи-

циент фильтрации, M — мощность водоносного слоя, S — понижение, R — радиус влияния или расстояние до контура области питания, a — половина расстояния между скважинами и r — радиус скважины¹.

§ 15. Для двух скважин, расположенных параллельно прямолинейному или близкому к нему по форме контуру питания, можно рекомендовать формулу Щелкачева:

$$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln 2bV \sqrt{\frac{b^2 + a^2}{a^2}}}, \quad (89)$$

где b — расстояние скважин до прямолинейного контура питания и a — половина расстояния между скважинами.

§ 16. Для трех скважин, расположенных по вершинам равностороннего треугольника и окруженных круговым контуром питания, можно применять формулу Мэската (рис. 15):

$$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^3}{l^2 r}}, \quad (90)$$

где l — расстояние между скважинами.

В данном случае, поскольку все три скважины находятся в одинаковых условиях, дебиты их будут равны между собой.

§ 17. Величина достигнутого понижения в какой-либо точке, согласно формуле (90), будет равна:

$$Q_x = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{x_1 x_2 x_3}{l^2 r}, \quad (91)$$

где x_1 , x_2 и x_3 — расстояния скважин до точки, для которой определяется величина понижения.

§ 18. Для четырех скважин, расположенных по вершинам квадрата, и при круговой форме контура питания можно рекомендовать следующую формулу Мэската (рис. 16):

$$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^4}{V \sqrt{2l^3 r}}}. \quad (92)$$

Дебиты всех четырех скважин в данном случае будут равны друг другу².

¹ В дальнейшем будут приводиться объяснения только новых, не встречающихся в предыдущем тексте, математических обозначений.

² Для трех и четырех скважин при прямолинейном контуре питания имеются формулы Щелкачева, опубликованные в его работе (20), стр. 190—196.

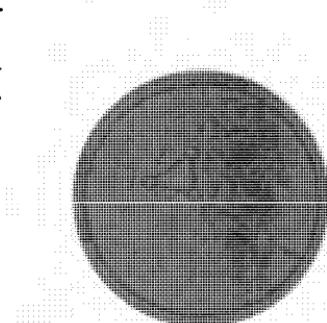


Рис. 15.

§ 19. Величина понижения в какой-либо точке, согласно формуле (92), будет равна:

$$S_x = \frac{Q}{2\pi K M} \ln \frac{x_1 x_2 x_3 x_4}{V^2 r}, \quad (93)$$

где x_1, x_2, x_3 и x_4 — расстояния скважин до данной точки.

§ 20. Для пяти скважин, из которых четыре расположены по вершинам квадрата и одна в центре его, и при круговой форме контура питания можно применять формулу Мэската (рис. 17):

$$Q = \frac{2\pi K M S}{\Delta \ln \frac{l}{V^2 r}}, \quad (94)$$

где $\Delta = 4 \ln \frac{\sqrt{2} R}{l} \ln \frac{l}{V^2 r} + \ln \frac{R}{r} \ln \frac{l}{4V^2 r}$ (94)

и l равно длине стороны квадрата.

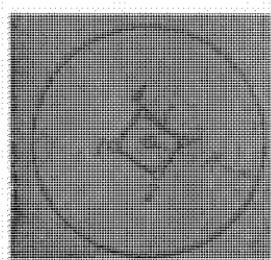


Рис. 16.

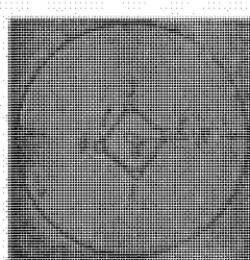


Рис. 17.

Дебит, определяемый формулой (94), будет иметь четыре скважины, расположенные в вершинах квадрата; пятая скважина, расположенная в центре, будет иметь несколько меньший дебит, который, по Мэскату, можно будет подсчитать пользуясь следующим соотношением:

$$Q_5 = Q_{1-4} \left(1 - \frac{\ln 4}{\ln \frac{l}{V^2 r}} \right), \quad (95)$$

где Q_5 обозначает дебит пятой скважины, а Q_{1-4} — дебит одной из остальных четырех скважин, подсчитанный по формуле (94).

§ 21. При девяти скважинах, расположенных, как показано на рис. 18, и при круговой форме контура питания. очевидно, дебиты скважин 1, 3, 7 и 9 будут равны друг другу, так же как дебиты скважин 2, 4, 6 и 8. Дебит скважины 5 будет иметь наименьшую величину.

Для этого случая Мэскатом предложено особое соотношение, благодаря которому можно определить дебит характерных для данной группы скважин:

$$Q_1 : Q_2 : Q_3 = (c^2 - 0,57c - 4,8) : (c^2 - 0,813c - 0,765) : \\ : (c^2 - 2,424c - 1,083), \quad (96)$$

где $c = \ln \frac{l}{r}$ и l означают длину стороны квадрата.

Дебит скважин 1, 3, 7 и 9, т. е. скважин, расположенных по вершинам квадрата, можно найти по формуле (94).

§ 22. Для скважин, расположенных по кругу и окруженных контуром питания круговой формы, Мэскат даёт

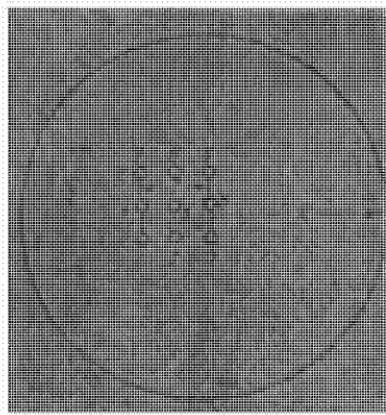


Рис. 18.

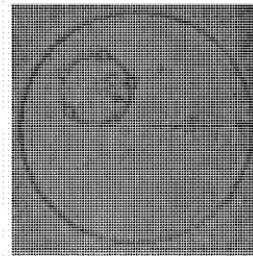


Рис. 19.

следующую формулу для дебита одной из скважин (рис. 19):

$$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{R^n}{r_1^{n-1} l} + \sum_{m=1}^{n-1} \ln 2 \sin \frac{\pi m}{n}}, \quad (97)$$

где r_1 — радиус круга, по которому расположены скважины, n — число скважин, m — в выражении, стоящем под знаком суммы, принимает значения от 1 до $n - 1$.

§ 23. Для подсчета дебита одной из скважин, расположенных по вершинам какого-либо правильного многоугольника при круговом контуре питания Щелкачевым предложена следующая формула:

$$Q = \frac{2\pi Rms}{R^{2n} - l^{2n}} \cdot \frac{1}{\ln \frac{nR^n l^{n-1}}{r}}, \quad (98)$$

где n — число скважин и l — расстояние скважин до центра правильного многоугольника.

3. Линейно расположенные группы скважин

§ 24. При линейном расположении взаимодействующих скважин последние размещаются приблизительно или точно вдоль одной или нескольких прямых линий.

§ 25. Линейные группы взаимодействующих скважин различаются между собой числом скважин, входящих в данную группу, и числом рядов или линий, вдоль которых располагаются скважины. Так, например, могут быть однорядные, двухрядные и т. д. группы линейно расположенных скважин; из всех таких скважин выделяются ряды с бесконечным числом скважин в одном ряде или вдоль одной линии.

§ 26. В отношении формы контура питания, так же как для мелких групп, различаются ряды скважин, расположенных параллельно или перпендикулярно прямолинейному контуру питания, и скважины, находящиеся внутри кругового или близкого к нему по форме контура питания.

§ 27. Линейные группы взаимодействующих скважин могут применяться, главным образом, для водоснабжения, для вертикальных дренажных сооружений и при осушении горизонтальных или наклонных горных выработок (отдельные штолни, штреки и т. п.).

§ 28. При выборе формул для расчета линейно расположенных взаимодействующих скважин нужно руководствоваться следующими соображениями:

а) число рядов в данной группе линейно расположенных скважин должно точно соответствовать числу рядов, для которого выведена данная формула;

б) группы линейно расположенных скважин с числом их более 10 — 15 можно с допустимым для практики приближением считать рядами с бесконечно большим числом скважин;

в) желательно, чтобы форма контура питания соответствовала указанной в избираемой для расчета формуле.

§ 29. Для определения дебита взаимодействующих скважин с расстоянием между ними, равным l и расположенным в один ряд параллельно и на расстоянии d от прямолинейного контура питания, в литературе имеются несколько громоздкие формулы Мэската и Щелкачева. В настоящем руководстве приведены только формулы Мэската, с формулами же Щелкачева можно ознакомиться в соответствующей его работе (20, стр. 179 — 187).

Для этого случая Мэскатом предложена следующая общая формула:

$$S = \frac{1}{4\pi KM} \left\{ 2 Q \ln \frac{2d}{r} - \Sigma' Q \ln \left[1 + \frac{4d^2}{l^2(n-j)^2} \right] \right\}, \quad (99)$$

где l — расстояние между скважинами, d — расстояние ряда скважин от прямолинейного контура питания, n — число скважин, j — переменное число, принимающее значение от 1 до $n-1$. Индекс-штрих означает исключение выражения, стоящего под знаком суммы, при $n-j$.

При $n=2$ на основании формулы (99) будем иметь:

$$S = \frac{1}{4\pi KM} \left\{ 2Q \ln \frac{2d}{r} - Q \ln \left[1 + \frac{4d^2}{l^2(2-1)^2} \right] \right\},$$

откуда

$$Q = \frac{\frac{2\pi KMS}{l}}{\ln \frac{2d}{r} + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{4d^2}{l^2} \right)}. \quad (100)$$

§ 30. Для $n=3$ из формулы (99) получаем следующее уравнение, решая которое, можно найти формулу для дебита одной из крайних скважин:

$$S = \frac{1}{4\pi KM} \left\{ 2Q \ln \frac{2d}{r} - Q \ln \left[1 + \frac{4d^2}{l^2(3-1)^2} \right] + Q \ln \left[1 + \frac{4d^2}{l^2(3-2)^2} \right] \right\}.$$

Отсюда дебит одной из этих скважин будет равен:

$$Q = \frac{\frac{4\pi KM S \ln \left[\left(\frac{2d}{r} \right)^2 : \left(1 + \frac{4d^2}{l^2} \right) \right]}{\left\{ \ln \left(\frac{2d}{r} \right)^2 \left[\ln \left(\frac{2d}{r} \right)^2 \left(1 - \frac{4d^2}{l^2} \right) - 2 \right] \left[\ln \left(1 + \frac{4d^2}{l^2} \right) \right]^2 \right\}}. \quad (101)$$

Дебит средней из трех скважин можно найти из соотношения:

$$\frac{Q_c}{Q} = 1 - \frac{\ln \left[\left(1 + \frac{4d^2}{l^2} \right) : \left(1 + \frac{4d^2}{l^2} \right) \right]}{\ln \left[\left(\frac{2d}{r} \right)^2 : \left(1 + \frac{4d^2}{l^2} \right) \right]}. \quad (102)$$

§ 31. Для определения дебита одной из скважин, составляющих бесконечный линейный ряд с расстоянием между скважинами, равным l , и на расстоянии d от прямолинейного и параллельного ряда скважин контура питания можно пользоваться формулой Мэската¹:

$$Q = \frac{2\pi KMS}{\frac{sh \frac{2\pi d}{l}}{ln \frac{sh \frac{\pi r}{l}}{sh \frac{\pi r}{l}}}}. \quad (103)$$

Величину напора в отдельных точках водоносного слоя можно найти из следующего уравнения, если при этом учесть, что ось

¹ В формуле (103) и в ряде последующих sh и ch соответственно означают синус и косинус гиперболические. Значение их берется из таблиц, приведенных в различных математических и инженерных справочниках, например, в справочнике Хютте.

x направлена вдоль ряда скважин, а ось *y* проходит через центральную скважину:

$$h_{(x,y)} = H - \frac{Q}{4\pi KM} \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi(y-d)}{l} - \cos \frac{2\pi x}{l}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi(y+d)}{l} - \cos \frac{2\pi x}{l}}. \quad (104)$$

§ 32. Если параллельно прямоугольному контуру питания расположены два бесконечных ряда скважин, имеющих одну и ту же величину понижения с расстоянием между ними, равным *l*, и с расстоянием до контура питания *d*₁ от первого ряда и *d*₂ от второго, то дебит скважины второго ряда можно найти, воспользовавшись следующим соотношением, предложенным Мэскатом:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\ln \frac{\pi r}{l} \operatorname{sh} \frac{\pi(d_2 + d_1)}{l}}{\ln \frac{\pi r}{l} \operatorname{sh} \frac{\pi(d_2 - d_1)}{l}} \cdot \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(d_2 + d_1)}{l}}{\operatorname{sh} \frac{\pi(d_2 - d_1)}{l}}. \quad (105)$$

При расстоянии скважин первого ряда от прямолинейного контура питания примерно более чем на 106 м дебит второго ряда колодцев будет меньше дебита скважин первого ряда примерно в два раза, независимо от расстояния между скважинами и их удаления от контура питания.

§ 33. Если в состав линейной группы входит более трех взаимодействующих скважин, то для расчета удобнее пользоваться методом Форхгеймера путем решения следующей системы уравнений при условии кругового контура питания, находящегося на расстоянии *R* от центра данной группы скважин:

$$S_1 = \frac{1}{2\pi KM} \left(Q_1 \ln \frac{R}{r} + Q_2 \ln \frac{R}{x_{1-2}} + Q_3 \ln \frac{R}{x_{1-3}} + \dots + Q_n \ln \frac{R}{x_{1-n}} \right)$$

$$S_2 = \frac{1}{2\pi KM} \left(Q_1 \ln \frac{R}{x_{2-1}} + Q_2 \ln \frac{R}{r} + Q_3 \ln \frac{R}{x_{2-3}} + \dots + Q_n \ln \frac{R}{x_{2-n}} \right)$$

$$\dots$$

$$S_n = \frac{1}{2\pi KM} \left(Q_1 \ln \frac{R}{x_{n-1}} + Q_2 \ln \frac{R}{x_{n-2}} + Q_3 \ln \frac{R}{x_{n-3}} + \dots + Q_n \ln \frac{R}{r} \right).$$

где *Q*₁ и *S*₁ означают дебит и понижение в первой скважине. *Q*₂ и *S*₂ — во второй и т. д., *x*₁₋₂ — расстояние от первой скважины до второй, *x*₁₋₃ — расстояние от первой до третьей, *x*₂₋₁ — от второй до первой и т. д.

Для решения этих уравнений заранее задаемся равным расстоянием между скважинами и равными дебитами или равными понижениями; тогда получим систему уравнений со столькими неизвестными, сколько имеется уравнений, число которых соответствует числу скважин. Наоборот, можно заранее задаться дебитами и понижениями, тогда в этих уравнениях останутся неизвестными расстояния между скважинами.

Таким образом взаимодействующие скважины могут быть рассчитаны так, чтобы все они давали один и тот же дебит, и тогда при равных расстояниях между ними в них будут созданы разные понижения, причем максимальное будет в центре, а минимальное—в крайних скважинах (рис. 20 а). Эта же система скважин может быть рассчитана при условии создания в них равных понижений; тогда при равных расстояниях скважины будут давать различный дебит, причем максимальный будут иметь крайние скважины и минимальный—центральные (рис. 20 б); наконец, скважины можно рассчитать так, чтобы они имели одинаковые дебиты и понижения, но в этом случае расстояния между ними будут разные, причем меньшие между крайними, а наибольшее—между центральными (рис. 20 в).

Для упрощения расчетов пользуются правилом симметрии. Дебиты, понижения и расстояния между линейно расположены скважинами будут одинаковыми для скважин, удаленных на равные расстояния от центра водозабора или от оси симметрии, проходящей перпендикулярно и через центр линии расположения скважин; таким образом число уравнений сокращается вдвое.

4. Метод Кирилайса

§ 34. Для расчета подобных в плане групп взаимодействующих скважин Кирилайсом предложен особый метод, основанный на определении суммарного дебита Q_1 малой группы скважин путем производства опытной откачки с последующим вычислением суммарного дебита большей группы артезианских скважин.

Метод Кирилайса применяется почти исключительно для линейно расположенных групп скважин, так как групп с иным

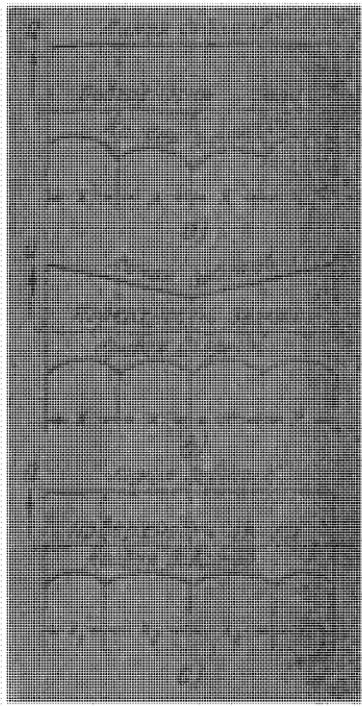


Рис 20.

расположением в плане на практике почти не встречается. Этот метод по сравнению с другими наименее точен.

§ 35. Если путем опытной откачки определен при том или ином понижении дебит Q_1 малой группы скважин (например, двух-трех, расположенных по одной линии), то суммарный дебит большего числа скважин по Кирилесу можно вычислить по следующим формулам:

а) при условии одинаковых понижений в обоих рядах скважин:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\ln R - \frac{1}{n_2} \ln x_1 x_2 \dots x_n}{\ln R_1 - \frac{1}{n_2} \ln x_1 x_2 \dots x_n}, \quad (106)$$

где Q_1 —суммарный дебит малой группы скважин, определенный опытным путем, Q_2 —суммарный дебит большей группы скважин, R —радиус влияния, n_1 и n_2 —число скважин соответственно в малой и большей группе их, $x_1, x_2 \dots x_n$ —расстояния от скважин для какой-либо точки;

б) при условии разных понижений:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{\ln R - \frac{1}{n_1} \ln x_1 x_2 \dots x_n}{\ln R - \frac{1}{n_2} \ln x_1 x_2 \dots x_n}, \quad (107)$$

где S_1 и S_2 —величины понижения соответственно в малой и большой группе скважин;

в) по приближенной формуле для случая одинаковых понижений:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{A - \ln N}{A},$$

где

$$A = \ln R - \frac{1}{n} \ln x_1 x_2 \dots x_n,$$

$$N = \frac{l_1}{l_2},$$

где l_1 и l_2

(108)

соответственно длины малого и большого ряда скважин;

г) по приближенной формуле для случая разных понижений:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{A - \ln N}{A}. \quad (109)$$

§ 36. Для определения суммарного дебита большей группы скважин по формулам (106) и (107) можно брать любую точку, от которой измеряются расстояния $x_1 x_2 \dots x_n$ до скважин, входящих в данную группу, но для удобства подсчетов обычно бе-

руг точку, расположенную точно по середине каждого ряда скважин.

§ 37. Поскольку точность подсчетов по методу Кирилайса вообще невелика, то в большинстве случаев рекомендуется не усложнять расчетов и пользоваться приближенными формулами (108) и (109), причем для расчетов в целях водоснабжения величину R следует брать максимально возможную для данных гидрогеологических условий, а для водопонизительных установок — наименьшую.

§ 38. Неточность определения суммарного дебита по методу Кирилайса будет тем большей, чем больше N , т. е. чем больше отношение длины ряда большей группы скважин к длине ряда меньшей группы¹.

5. Скважины, расположенные по сеткам

§ 39. Для добычи жидких полезных ископаемых (например нефти) и для дренирования значительных по размерам участков водоносных слоев (например, для очистных работ в пластовых месторождениях) сооружается довольно большое количество взаимодействующих скважин, расположенных в плане рядами; при этом число скважин в одном ряде таково, что практически каждый ряд можно рассматривать как состоящий из бесконечного числа скважин. В этом случае всю дренируемую площадь разбивают на отдельные окружающие скважину небольшие участки, являющиеся областями питания каждой скважины в отдельности. Таким образом радиус питания каждой скважины, входящей в данную сеть, равняется половине расстояния между ними (рис. 3).

§ 40. Скважины, входящие в состав той или иной сети, могут располагаться или в шахматном порядке или друг против друга.

§ 41. Приведенные ниже формулы для определения дебита скважин, расположенных по сеткам, могут быть использованы для предварительных ориентировочных подсчетов. Кроме того, при одновременной работе всех скважин, входящих в состав сети, происходит не только откачка пополняемых запасов жидкости, но частично и сработка статических запасов подземных вод. Поэтому дебит, вычисленный на основании приведенных ниже формул, следует рассматривать как первоначальный, величина которого с течением времени будет постепенно уменьшаться.

§ 42. При расположении скважины в сети в шахматном порядке (рис. 3) дебит одной скважины может быть определен по формуле Мэската

$$Q = \frac{\pi KMS}{\ln \frac{a}{r} - 0,62}, \quad (110)$$

¹ Примеры подсчетов по методу Кирилайса будут приведены в разделе 3 главы IV.

где a —половина расстояния между скважинами.

§ 43. Величина понижения в отдельных точках, удаленных от данной скважины на расстояние, меньшее половины расстояния между ними, по Мэскату, определяется следующим уравнением:

$$S = \frac{Q}{\pi K M} \left(\ln \frac{\pi r}{2a} + 0,167 \right), \quad (111)$$

где a —половина расстояния между скважинами.

§ 44. При расположении скважин в сети друг против друга дебит одной из них можно определить по формуле, предложенной Мэскатом:

$$Q = \frac{2\pi KMS}{\ln \frac{\operatorname{sh}^4 \frac{\pi d}{l} \operatorname{sh}^3 \frac{3\pi d}{l}}{\operatorname{sh}^2 \frac{\pi r}{l} \operatorname{sh}^3 \frac{2\pi d}{l}}}, \quad (112)$$

где l —расстояние между скважинами и d —половина расстояния между их рядами.

6. Метод Альтовского

§ 45. Гидравлический метод автора основан на том, что дебит взаимодействующих скважин равен дебиту невзаимодействующих, умноженному на суммарный коэффициент влияния, или на единицу минус суммарный коэффициент снижения дебита

$$Q' = \Sigma \beta f(S) \text{ и } Q' = (1 - \Sigma \alpha) f(S), \quad (113)$$

где Q' —дебит взаимодействующей скважины, $\Sigma \beta$ и $\Sigma \alpha$ —суммарные коэффициенты влияния и снижения дебита и $f(S)$ —функция, выраженная для данной группы скважин зависимость дебита от понижения, определяемая на основании данных опытных откачек из одиночных скважин.

§ 46. Величина коэффициента снижения дебита или коэффициента влияния может быть определена:

1) по данным групповых откачек минимум из двух скважин при пользовании следующими соотношениями:

$$\alpha = \left(1 - \frac{Q'}{Q} \right) = \left(1 - \frac{q'}{q} \right) \text{ и } \beta = \frac{Q'}{Q} = \frac{q^1}{q}, \quad (114)$$

где Q^1 и q^1 означают дебит и удельный дебит скважин, полученные при групповой откачке, а Q и q —при откачке из одиночных скважин. При этом Q' и Q , а также q' и q обязательно должны относиться к одной и той же величине понижения. Например, нельзя определять коэффициент влияния, взяв полученные при групповой откачке дебит или удельный дебит, соответствующие понижению 6 м, а при одиночных—3 м;

2) по данным групповых откачек из двух опытных скважин

или откачек из одиночных скважин минимум с одной наблюдательной скважиной по следующим основным формулам:

а) при условии равенства понижений:

$$\alpha_1 = \frac{t_1}{S_2} \text{ и } \alpha_2 = \frac{t_2}{t_1}, \quad (115)$$

(приближенные формулы),

$$\alpha'_1 = \frac{t_1}{S_2 + 1} \text{ и } \alpha'_2 = \frac{t_2}{S_1 + t_2} \quad (116)$$

(более точные формулы),

б) при условии неравенства понижений в опытных скважинах:

$$\alpha'_1 = \frac{t_1}{S_1} \text{ и } \alpha'_2 = \frac{t_2}{S_2} \quad (117)$$

приближенные формулы,

$$\alpha'_1 = \frac{t_1 S_2}{S_1 S_2 + t_1 S_1} \text{ и } \alpha'_2 = \frac{t_2 S_1}{S_1 S_2 + t_2 S_1} \quad (118)$$

(более точные формулы)

$$\alpha'_1 = \frac{t_1 (S_2 - t_2)}{S_1 S_2 - t_1 t_2} \quad (\text{формула, действительная только для скважин, имеющих меньшее понижение}).$$

В этих формулах α_1 и α_2 означают коэффициенты снижения дебита при условии равенства понижений соответственно для скважин 1 и 2, α'_1 и α'_2 — то же при условии неравенства понижений, S_1 и S_2 — понижения в опытных скважинах 1 и 2 (причем S_1 меньше S_2), t_1 и t_2 — срезки уровня воды в тех же скважинах.

§ 47. При использовании формул, приведенных в предыдущем параграфе, следует иметь в виду, что

$$\beta_1 = 1 - \alpha_1 \text{ и } \beta_2 = 1 - \alpha_2, \quad (119)$$

$$\alpha'_1 = \alpha'_1 \frac{S_1}{S_2}; \quad \alpha'_2 = \alpha'_2 \frac{S_2}{S_1} \text{ и } \alpha'_1 = \alpha_1 \frac{S_2}{S_1}; \quad \alpha'_2 = \alpha_2 \frac{S_1}{S_2}, \quad (120)$$

где β_1 и β_2 означают коэффициенты влияния скважин 1 и 2.

§ 48. Кроме указанных в § 46 основных формул, в теоретической части даны формулы (глава II, раздел 4), позволяющие вычислить по нашему выбору несколько преуменьшенные или преувеличенные значения коэффициентов влияния и снижения дебита, смотря по характеру производственной задачи.

§ 49. Для непрямoliniевых зависимостей дебита от понижения сначала нужно определить величину действительной срезки уровня воды по формуле (45) и затем по формулам (40) и (41) — коэффициент влияния.

§ 50. Если зависимость дебита от понижения в опытной скважине и в соседней наблюдательной или в другой опытной скважине выражается разными функциями, то величина действительной срезки уровня воды должна определяться по другим формулам. Например, если $Q = q\sqrt{S}$ и $Q = q_1 t_1$, где t_1 — срезка уровня воды в соседней скважине, то величину действительной срезки уровня воды t'_1 можно определить по формуле:

$$t'_1 = \frac{t_1 + t_1}{2S_2} \cdot \frac{t_1 + 4S_2}{t_1 + 4S_2} . \quad (121)$$

Индексы 1 и 2 в формуле (121) указывают, что величина срезки уровня и понижения берется по разным скважинам.

§ 51. Определенная тем или иным способом величина коэффициента влияния действительна для данного участка водоносного горизонта, данного диаметра и расстояния между скважинами.

§ 52. Все существенные изменения общих геолого-гидрогеологических условий должны учитываться путем сооружения и производства откачек из дополнительных опытных узлов, располагаемых на отдельных участках водоносного слоя, существенно отличающихся по геолого-гидрогеологическим условиям друг от друга. Благодаря этому мы получим значения интересующих нас коэффициентов, действительные для отдельных участков водоносного горизонта, распространенного в изучаемом районе. Если же в данном районе существенных изменений в общих геолого-гидрогеологических условиях не наблюдается, то величина коэффициента влияния, определенная для какого-нибудь одного участка водоносного горизонта, может быть распространена с той или иной, не вполне допустимой, погрешностью и на другие аналогичные ему участки.

§ 53. При гидрогеологических изысканиях в целях водоснабжения опытные узлы, состоящие из двух скважин, и водозаборы обычно располагаются перпендикулярно направлению течения подземного потока, а водопонизительные установки - примерно по тому контуру, в пределах которого необходимо создать то или иное понижение уровня подземных вод. Поскольку в настоящее время неизвестны изменения водообильности скважин в зависимости от расположения их по отношению к направлению течения подземного потока, и поскольку это обычно не учитывается во всех гидрогеологических расчетах, постольку и в данном случае при расчете взаимодействующих скважин этим обстоятельством можно пренебречь. Это тем более допустимо, что опытные скважины обычно располагаются по линии будущих эксплоатационных скважин и тем самым расположение их относительно течения подземного потока соответственно будет влиять на результаты опытных откачек и на величину срезки уровня воды в скважинах.

§ 54. Так как конечный диаметр и диаметр фильтров эксплуатируемых и опытных скважин обычно мало отличаются друг от друга, то значением этого фактора для величины коэффициента влияния можно пренебречь. При проектировании водозаборных сооружений в целях водоснабжения диаметры эксплоатационных скважин принимают несколько большими, чем диаметры опытных скважин. Поэтому связанное с этим некоторое увеличение количества воды может отразиться только в благоприятном смысле. Вообще же в опытных скважинах следует устанавливать фильтры тех же типов и примерно тех же диаметров, которые будут

приняты для эксплоатационных скважин. Это вызывается не только соображениями простоты расчетов, но и тем, что при гидрогеологических изысканиях обычно приходится проектируемые типы и диаметры фильтров испытывать в полевых условиях.

§ 55. Если зависимость дебитов от понижения в данной скважине и от срезки уровня воды в соседней (при условии равенства понижений в проектируемых скважинах) выражается одной и той же функцией и отличается только постоянными коэффициентами, то величины коэффициентов влияния и снижения дебита не зависят от величины понижения и могут без больших погрешностей приниматься за величины постоянные для всех понижений.

Примечание При этом следует учитывать, что все расчеты дебита и понижения, так же как и для независимо действующих скважин, допустимо производить только в тех пределах экстраполяции, которые можно принять для соответствующих функций, выражающих зависимость дебита от понижения.

Во всех других случаях по мере увеличения понижения величина коэффициента влияния, при условии равенства понижений в проектируемых скважинах, будет увеличиваться, а коэффициенты снижения дебита будут уменьшаться; но так как эти изменения обычно относительно невелики, то практически во всех случаях величину этих коэффициентов можно принимать постоянной для всех понижений.

Примечание. В случае необходимости и, проведя откачуку не менее чем с тремя понижениями, можно для каждого из них в отдельности подсчитать значение α и β и по этим данным всегда определить зависимость $\beta = f(S)$ и $\alpha = f(S)$.

§ 56. Величина коэффициента снижения дебита для различных расстояний между скважинами может быть определена по формуле:

$$\alpha_2 = \alpha_1 - \frac{\lg R/x_2}{\lg R/x_1}, \quad (122)$$

где α_2 —коэффициент снижения дебита, действительный для определяемого расстояния x_2 , α_1 — тот же коэффициент, величина которого известна для расстояния x_1 , и R —радиус влияния, определяемый согласно указаниям, данным в § 7.

§ 57. Величина срезок уровня воды для различных расстояний между скважинами определяется по аналогичной формуле:

$$t_2 = t_1 - \frac{\lg R/x_2}{\lg R/x_1}. \quad (123)$$

§ 58. Коэффициент влияния в случае непрямолинейной зависимости $Q=f(S)$ для различных расстояний между скважинами может быть определен:

а) по формуле:

$$\beta_2 = \sqrt{1 - \frac{t_2}{S}} \quad \text{и} \quad \beta_2 = \sqrt[3]{1 - \frac{t_2}{S}}, \quad (124)$$

где t_2 —величина действительной срезки уровня воды, вычисленной по формуле (123) или проще

б) по формуле:

$$\beta_2 = 1 - \alpha_2 = 1 - \alpha_1 \frac{\lg \frac{R/x_2}{R/x_1}}{\lg \frac{R/x_2}{R/x_1}}. \quad (125)$$

§ 59. Суммарная срезка уровня воды Σt будет равна сумме действительных срезок уровня воды в скважине:

$$\Sigma t = t_1 + t_2 + \dots + t_n. \quad (126)$$

§ 60. Суммарный коэффициент снижения дебита равняется сумме отдельных коэффициентов снижения дебита, определяемых по формуле (122) для различных расстояний между скважинами

$$\Sigma \alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n. \quad (127)$$

§ 61. Суммарный коэффициент влияния $\Sigma \beta$ равен произведению отдельных коэффициентов влияния, вычисленных по формулам (124) и (125) для различных расстояний между скважинами:

$$\Sigma \beta = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n. \quad (128)$$

Примечание. Дебит, вычисленный с учетом суммарного коэффициента его снижения, будет несколько меньше дебита, определенного на основании суммарного коэффициента влияния.

§ 62. При подсчетах Σt и $\Sigma \alpha$, а также $\Sigma \beta$ по формулам (126) (127) и (128) следует принимать во внимание только влияние скважин, расположенных от данной на расстоянии меньшем одного радиуса влияния. Коэффициентами снижения дебита, меньшими 0,01, или соответственно коэффициентами влияния, большими 0,99, при расчетах можно пренебречь.

§ 63. При расчетах по суммарному коэффициенту снижения дебита иногда можно вводить поправку на одновременное влияние всех скважин. С учетом этого действительный суммарный коэффициент снижения $\Sigma \alpha_o$ будет равен:

$$\Sigma \alpha_o = \Sigma \alpha \left(\frac{S}{S + \Sigma t} \right), \quad (129)$$

где $\Sigma \alpha$ —суммарный коэффициент снижения дебита, определенный по формуле (127), S —одно, обычно наибольшее, из понижений, полученных при опытной откачке, и Σt —суммарная срезка, определенная по формулам (123) и (126).

§ 64. Указанную в предыдущем параграфе поправку нет практического смысла вводить в следующих случаях:

а) когда скважины отстоят друг от друга на сравнительно значительном расстоянии,

б) когда хотят получить несколько преуменьшенную цифру суммарного дебита и

в) когда расчет производится по данным одиночных откачек, при недостаточной продолжительности которых всегда есть опасение получить заниженные величины срезок уровня воды и, следовательно, завышенную величину суммарного дебита.

В этом случае заниженное вследствие недостаточной продолжительности откачки значение срезок уровня воды должно компенсироваться несколько увеличенным коэффициентом снижения дебита.

§ 65. Величину суммарного коэффициента снижения дебита более точно можно определить по формуле:

$$\Sigma \alpha = \frac{\Sigma t}{S + \Sigma t}, \quad (130)$$

где S — проектируемое в скважинах понижение, $\Sigma t = t_1 + t_2 + \dots + t_n$ — срезки уровня воды; t_1 вычисляется путем пропорционального увеличения срезки, наблюдавшейся при опытной откачке, t_2 и т. д. — по формуле (123).

§ 66. При расчете взаимодействующих скважин, в которых проектируются или существуют разные понижения, необходимо вводить поправки на соотношение понижений и при расчетах пользоваться формулами (86) и (87).

§ 67. Для удобства расчетов опытные откачки рекомендуется проводить с одинаковыми по величине понижениями и для всех опытных скважин подбирать одинаковые зависимости $Q = f(S)$. Например, если данные опытных откачек с приближенно одинаковой точностью можно выразить формулами $Q = q\sqrt{S}$ и $Q = q\sqrt[m]{S}$, причем некоторые данные все же более точно отвечают одной формуле, а другие другой, то для расчетов следует выбирать только одну из них.

7. Особые случаи расчета взаимодействующих артезианских скважин

§ 68. Если скважины расположены в один ряд перпендикулярно прямолинейному контуру питания на расстоянии d от него и параллельно (рис. 10) какому-нибудь водонепроницаемому контуру (например, параллельно дайке, сложенной водонепроницаемой породой), то дебит скважин, благодаря последнему обстоятельству, уменьшается. При этом их дебит, по Щелкачеву (20), будет равен дебиту скважин для случая удвоенного числа скважин, расположенных в один ряд и идущих параллельно водопроницаемому контуру на том же расстоянии d от него. Таким образом, если параллельно водонепроницаемому контуру и перпендикулярно водопроницаемому контуру расположены две скважины, то их дебит следует определять по формулам, данным для четырех скважин, идущих параллельно водопроницаемому контуру.

§ 69. Если две скважины расположены параллельно прямолинейному контуру питания, но имеют различные понижения, то дебит скважины, имеющей большее понижение, можно определить по следующей формуле Щелкачева

$$Q = \frac{2\pi K M S_i}{\ln \left[\frac{2h}{r} \left(\sqrt{\frac{h^2 + a^2}{a}} \right)^e \right]}, \quad (131)$$

а дебит скважины, имеющей меньшее понижение, будет равен $Q_1 = \varepsilon Q$, где S_i — понижение, в данном случае разное для обеих скважин, h — расстояние скважин до прямолинейного контура питания, a — половина расстояния между скважинами и ε — определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{\frac{S_1}{S_2} \ln \frac{2h}{r} - \ln \frac{\sqrt{h^2 + a^2}}{a^2}}{\ln \frac{2h}{r} - \frac{S_1}{S_2} \ln \frac{\sqrt{h^2 + a^2}}{a^2}}, \quad (132)$$

где S_1 и S_2 — понижения в первой и во второй скважинах.

§ 70. Если скважины, имеющие разные понижения, располагаются перпендикулярно прямолинейному контуру питания на расстоянии от него l_1 и l_2 , то их дебит можно вычислить по формуле Щелкачева:

$$Q = \frac{2\pi KMS_i}{\ln \frac{2l_1}{r} \frac{l_2 + l_1}{l_2 - l_1}}, \quad (133)$$

где S_i — соответствующие понижения в скважинах; $l_1 < l_2$ — расстояния скважин от прямолинейного контура питания и ε — вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\frac{S_1}{S_2} \ln \frac{2l_2}{r} - \ln \frac{l_2 + l_1}{l_2 - l_1}}{\ln \frac{2l_1}{r} - \frac{S_1}{S_2} \ln \frac{l_2 + l_1}{l_2 - l_1}}. \quad (134)$$

§ 71. Если скважины сооружаются в крутопоставленных слоях, но располагаются по простианию их, то наклон слоев не влияет на степень взаимодействия скважин и для определения их дебита можно применить формулу, соответствующую тому или иному случаю.

§ 72. Если скважины сооружаются в крутопоставленных слоях по их падению, но динамические уровни в них будут находиться на одной и той же абсолютной высоте, для чего придется, конечно, в скважинах создать разные понижения, то и для данного случая наклон слоев не будет иметь значения.

§ 73. Если скважины располагаются по падению крутопоставленных слоев и имеют динамические уровни воды на разных абсолютных отметках, то во всех формулах необходимо величину S заменить разностью напоров, отсчитываемых от плоскости сравнения, в качестве которой большей частью принимается высота уровня моря.

8. Некоторые дополнительные условия применения формул

§ 74. Рассматриваемые формулы следует применять для так называемых совершенных артезианских скважин. Для несовершен-

ных скважин допустимо, правда, без каких-либо серьезных обоснований, как это рекомендуют некоторые авторы, применять соответствующие поправки и формулы, предложенные Паркером, Замарином, Форхгеймером и Козени.

§ 75. Число скважин и геометрическое расположение их в плане должно точно соответствовать тем условиям, для которых выведена та или иная формула. Без больших погрешностей, особенно при значительном удалении скважин от контура области питания, можно формулы, данные для кругового контура, применять к прямолинейному контуру питания, и наоборот.

§ 76. По указанным формулам, как не учитывающим сопротивления труб и фильтров, можно подсчитывать величину напора только у внешней стенки обсадных труб, но нельзя по ним подсчитать положение динамического уровня внутри скважин, что в очень многих случаях имеет первенствующее значение, хотя по некоторым, чисто теоретическим соображениям, для артезианских скважин так называемый „прыжок“ уровней не имеет существенного значения.

§ 77. Кроме того, следует учитывать, что все формулы, за исключением формул Форхгеймера, выведены при условии равенства расстояний между скважинами, а это в ряде случаев ограничивает возможность их применения. Если расстояния между скважинами отличаются друг от друга незначительно, то допустимо в расчет вводить среднеарифметическое или средневзвешенное расстояние между скважинами.

§ 78. Ниже приводятся указания и условия применения гидравлического метода Альтовского. Предложенный им метод дает приближенное решение вопроса о взаимодействии артезианских скважин, работающих в условиях подземного потока с точностью, вполне достаточной для инженерной практики.

§ 79. Этот метод может применяться и для так называемых „несовершенных“ скважин во всех случаях, когда зависимость дебита от понижения для них может быть выражена одной из существующих формул.

§ 80. Расчет по этому методу может быть произведен только в том случае, если предварительно были проведены соответствующие опытные откачки. Проведение групповых откачек не обязательно, но желательно в случае производства расчетов для ответственных сооружений.

§ 81. Точность гидравлического метода в основном зависит от надежности опытных данных, обусловленных, главным образом, длительностью проведенной опытной откачки и, в значительной части, от точности расчетов при экстраполяции по существующим формулам для дебита буровых скважин. Поэтому, вообще говоря, нельзя рекомендовать производить расчеты взаимодействующих скважин для таких величин понижения, при которых нет уверенности в правильности определения по су-

ществующим формулам дебита невзаимодействующих скважин¹.

§ 82. Этот метод может давать большие погрешности, начиная с расстояния, меньшего 16 диаметров между скважинами.

9. Примеры расчета взаимодействующих скважин

§ 83. Обычно при производстве гидрогеологических исследований для устройства водоснабжения на практике встречаются с двумя основными задачами. Одна из них возникает при детальных гидрогеологических исследованиях для проектирования новых водозаборов, причем основные данные получаются из наблюдений при одиночных и групповых откачках из скважин, входящих в состав опытного узла.

Для проектирования новых водозаборов нужно, на основе этих данных, подсчитать суммарный дебит взаимодействующих скважин и понижения в них и подобрать расстояние между проектируемыми скважинами. Вторая задача связана с определением суммарного расхода и понижения для уже сооруженного водозабора, или для существующей группы скважин в целях дальнейшей рациональной их эксплоатации. Принципиальное отличие второй задачи от первой заключается в том, что в этом случае мы имеем заданные расстояния между эксплоатационными скважинами, изменять которые можно только путем исключения некоторых скважин из эксплоатации, если в этом, конечно, встречается необходимость.

§ 84. Вторая задача обычно встречается в двух вариантах:

а) когда на основе детальных изысканий, вследствие большого разнообразия условий водоносности (например, трещиноватые, раскарстованные породы), сначала сооружаются эксплоатационные скважины первой очереди, которые затем опробуются соответствующими опытными откачками, и только после этого дается заключение о их суммарном расходе, и окончательно составляется проект насосной станции и

б) когда на фабрике, заводе или в каком-нибудь населенном пункте имеется ряд буровых скважин, действующих или в некоторых случаях даже неэксплоатирующихся, для которых нужно определить суммарный дебит и условия их рациональной эксплоатации.

§ 85. При решении второй задачи необходимо произвести из всех скважин одиночные откачки, сопровождаемые наблюдениями за понижением в неоткачиваемых скважинах. Это дает возможность определить зависимости дебита от понижения для каждой скважины в отдельности и зафиксировать величину срезки уровня во всех скважинах данной группы под влиянием одиночных откачек; последние, как обычно, следует проводить не менее чем с тремя понижениями.

¹ Допустимые пределы экстраполяции указаны в работе М. Е. Альтовского (5).

Первую задачу удобнее всего решать по методу суммарных коэффициентов снижения дебита или влияния, а вторую — в случае движения подземных вод по закону Дарси и по методу суммарной срезки.

§ 86. Прежде чем перейти к примерам, взятым из практики гидрогеологических исследований, возьмем простой числовой пример, позволяющий конкретизировать различные способы определения коэффициента снижения по данным откачек из двух опытных скважин.

Допустим, что при откачке воды из скважины 1 в ней наблюдалось понижение S_1 , равное 2 м, и срезка уровня воды t_2 в соседней скважине 2 была равна 0,1 м. Наоборот при откачке воды из скважины 2 соответственно было зафиксировано понижение S_2 , равное 20 м, и t_1 , равное 1 м. Отсюда следует, что опытная откачка в данном случае была проведена с разными понижениями в опытных скважинах.

Воспользовавшись формулами, приведенными в § 46 и 47, получим следующие значения коэффициентов снижения дебита:

а) Для случая одинаковых понижений:

$$\alpha_1 = \frac{t_1}{S_2} = \frac{1}{20} = 0,05, \text{ действительное для 20-метрового понижения};$$

$$\alpha_2 = \frac{t_2}{S_1} = \frac{0,1}{2} = 0,05, \text{ действительное для 2-метровых понижений.}$$

Поскольку коэффициент снижения дебита при условии равенства понижения не зависит от величины понижения, его значение получилось одинаковым как для 2-метрового, так и для 20-метрового понижений.

$$\alpha_1 = \frac{t_1}{S_2 + t_1} = \frac{1}{20 + 1} = 0,0476$$

$$\alpha_2 = \frac{t_2}{S_1 + t_2} = \frac{0,1}{2,0 + 0,1} = 0,0476$$

Более точные значения α для 2- и 20-метровых понижений.

б) Для случая разных понижений:

$$\alpha_1' = \frac{t_1}{S_1} = \frac{1}{2} = 0,5$$

$$\alpha_2' = \frac{t_2}{S_2} = \frac{0,1}{20} = 0,005$$

В случае разных понижений скважины имеют разные значения α в зависимости от соотношения уровней воды.

$$\alpha_1' = \frac{t_1 S_2}{S_1 S_2 + t_1 S_1} = \frac{1 \cdot 20}{20 \cdot 2 + 1 \cdot 2} = 0,476$$

$$\alpha_2' = \frac{S_1}{S_1 S_2 + t_2 S_2} = \frac{0,1 \cdot 2}{20 \cdot 5 + 0,1 \cdot 20} = 0,00476$$

Более точные значения α_1' и α_2'

в) Для случая разных понижений коэффициент снижения

дебита для скважины, имеющей меньшее понижение, можно подсчитать по такой формуле:

$$\alpha_2' = \frac{t_1(S_2 - t_2)}{S_1 S_2 - t_1 t_2} = \frac{1,0(20 - 0,1)}{20 \cdot 2 - 0,1 \cdot 1,0} = 0,499.$$

Но если подсчитать α_2' по аналогичной формуле, то получим

$$\alpha_2' = \frac{t_1(S_1 - t_1)}{S_1 S_2 - t_1 t_2} = \frac{0,1(2 - 1)}{20 \cdot 2 - 0,1 \cdot 1,0} = 0,0025$$

вместо ожидаемого значения $\alpha_2' = 0,005$, вычисленного по ранее приведенным формулам.

г) Значение коэффициентов снижения дебита для одинаковых и разных понижений можно определить, пользуясь следующими соотношениями:

$$\alpha_1 = \alpha'_1 = \frac{S_1}{S_2} = 0,5 \cdot \frac{2}{20} = 0,05 \text{ и } \alpha_2 = \alpha'_2 \frac{S_2}{S_1} = 0,005 \cdot \frac{20}{2} = 0,05$$

и наоборот:

$$\alpha'_1 = \alpha_1 = \frac{S_2}{S_1} = 0,05 \cdot \frac{20}{2} = 0,5 \quad \alpha'_2 = \alpha_2 \frac{S_1}{S_2} = 0,05 \cdot \frac{2}{20} = 0,005.$$

§ 87. Расчет взаимодействующих скважин необходимо начинать с определения по данным опытных откачек в отдельности для каждой скважины вида функции, выражающей зависимость дебита от понижения в данной скважине и от срезки уровня воды во всех остальных.

Для выполнения этого для каждой опытной скважины нужно вычертить график, по оси ординат которого откладывается удельный дебит q или удельный дебит по срезке q_x , а по оси абсцисс—понижение или соответственно срезка уровня воды в соседней скважине.

§ 88. Если удельный дебит и удельный дебит по срезке для всех понижений будет иметь, примерно, одно и то же значение, то мы будем иметь дело с прямолинейными зависимостями; если же удельный дебит и удельный дебит по срезке будут уменьшаться по закону прямой линии, то интересующие нас зависимости будут параболическими; и наконец, в случае уменьшения удельного дебита и удельного дебита по срезке кривой линии—зависимости дебита от понижения и от срезки уровня воды будут степенными.

§ 89. В соответствии с полученными результатами по определению вида интересующих нас зависимостей для расчета взаимодействующих скважин нужно выбирать соответствующие тому или иному случаю формулы. Техника расчета будет показана ниже на нескольких примерах.

§ 90. При одиночных откачках воды из двух опытных сква-

жин, проведенных до артезианского водоносного горизонта, сложенного разнозернистыми гравелистыми песками, были получены данные, указанные в табл. 6.

Таблица 6

Первая опытная скважина			Вторая опытная скважина			Примечание
Дебит Q_1 л/сек	Понижение S_1 м	Срезка уровня t_1 м	Дебит Q_2 л/сек	Понижение S_2 м	Срезка уровня t_2 м	
6,10	1,20	0,19	6,15	1,20	0,18	Из обеих скважин была проведена групповая откачка. Расстояние между скважинами 200 м.
16,00	3,00	0,39	15,65	3,00	0,42	
25,40	5,00	0,66	25,80	4,95	0,69	

§ 91. Анализ данных, приведенных в табл. 6, показывает, что в данном случае мы имеем дело с прямолинейными зависимостями.

§ 92. По указанным в табл. 6 данным и по соответствующим формулам вычисляем коэффициент снижения дебита для первой скважины (результаты приведены в табл. 7) и для второй скважины (табл. 8) и проверяем его величину по данным групповой откачки, пользуясь формулой (114).

Таблица 7

Понижение при групповой откачке м	α_1 — для первой скважины					По данным групповой откачки
	$\frac{t_1}{S_2}$	$\frac{t_1}{S_2} - \frac{t_1^2}{S_2^2}$	$\frac{t_1}{S_2} - \frac{t_1^2}{S_2^2} + \frac{t_1^3}{S_1^3}$	$\frac{t_2}{S_1 + t_2}$	$\frac{t_1 S_1 (S_2 - t_2)}{(S_1 S_2 - t_1 t_2) S_2}$	
1,20	0,158	0,133	0,136	0,136	0,137	0,180
3,00	0,130	0,113	0,115	0,115	0,114	0,175
5,50	1,133	0,115	0,117	0,117	0,117	0,128

§ 93. По данным табл. 7 и 8 принимаем, что коэффициент снижения дебита для первой опытной скважины равен 16 % и для второй — 14 % при расстоянии между скважинами в 200 м. Далее, с заведомым преувеличением примем, что радиус влияния равняется 1000 м, и для дальнейших расчетов зададимся, что в состав проектируемого водозабора будет входить девять скважин, работающих с понижением в 7 м.

§ 94. Сначала произведем подсчет суммарного коэффициента снижения дебита при расстоянии между скважинами в 200 м, т. е. при расстоянии, которое было между опытными скважинами.

Таблица 8

Понижение <i>m</i>	α_2 —для второй скважины					По дан- ным группо- вой от- качки
	$\frac{t_2}{S_1}$	$\frac{t_2}{S_1} - \frac{t_2^2}{S_1^2}$	$\frac{t_2}{S_1} - \frac{t_2^2}{S_1^2} + \frac{t_2^3}{S_1^3}$	$\frac{t_2}{S_1 + t_2}$	$\frac{t_2 S_2 (S_1 - t_1)}{(S_1 S_2 - t_1 t_2) S_1}$	
1,20	0,150	0,127		0,130	0,130	0,138
3,00	0,140	0,120		0,127	0,127	0,138
5,50	0,138	0,118		0,122	0,122	0,138

Нам известно, что наибольшее количество воды при взаимодействии будет терять скважина, расположенная в центре водозабора; поэтому для нее, как находящейся в наихудших условиях, вычислим суммарный коэффициент снижения дебита.

§ 95. На скважину, расположенную в центре водозабора, будут влиять скважины, находящиеся от нее на расстоянии 200, 400, 600 и 800 м; для этих расстояний и вычислим коэффициент снижения дебита по формуле (122):

$$\alpha_{400} = \alpha_{200} \frac{\lg \frac{1000}{400}}{\lg \frac{1000}{200}} = 16 \cdot 0,57 = 9,1\%.$$

Аналогично для расстояний 600 и 800 м получим $\alpha_{600} = 5,1\%$ и $\alpha_{800} = 2,2\%$. Следовательно, суммарный коэффициент снижения дебита будет равен:

$$\Sigma \alpha = 2 (\alpha_{200} + \alpha_{400} + \alpha_{600} + \alpha_{800}) = (16,0 + 9,1 + 5,1 + 2,2) = 64,8\%.$$

Перед суммой в скобках поставлена цифра 2, так как аналогичное влияние будут оказывать и скважины, расположенные по другую сторону от центральной.

§ 96. В данном случае мы получили неприемлемую величину суммарного коэффициента снижения дебита; практически эта величина не должна быть более 25—35%, так как при снижении дебита до 50% мы, по сути дела, будем сооружать юнужные скважины. Следовательно, расстояние между эксплоатационными скважинами нужно увеличить.

§ 97. Примем это расстояние равным 300 м; для него коэффициент снижения дебита будет равен:

$$\alpha_{300} = \alpha_{200} \frac{\lg \frac{1000}{300}}{\lg \frac{1000}{200}} = 11,8\%.$$

Для расстояния 600 м α равняется 5,0% и, наконец, для расстояния 900 м $\alpha = 0,9\%$.

§ 98. Зная величины коэффициентов снижения, можно составить таблицу, по которой определяется суммарный коэффициент снижения дебита для каждой скважины в отдельности. При этом следует учитывать, что коэффициентами снижения дебита меньшими 1% можно пренебречь. В данном случае на центральные скважины будут влиять всего шесть скважин, а на крайние—только три. Чтобы при составлении табл. 9 избежать ошибок, сначала следует записывать влияние скважин, идущих вверх по столбцу, а затем вниз.

Таблица 9

№ сква- жины	Рас- сто- яние м	Влияние с одной стороны			Влияние с другой стороны			$\Sigma \alpha$	$q(1-\Sigma \alpha)$ л/сек	$q(1-\Sigma \alpha)S$ при $S = 7$ м л/сек
		α_{900}	α_{600}	α_{800}	α_{300}	α_{600}	α_{900}			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1200	0,000	0,000	0,000	0,118	0,050	0,009	0,177	4,2	29,4
2	900	0,000	0,000	0,118	0,118	0,050	0,009	0,295	3,6	25,2
3	600	0,000	0,050	0,118	0,118	0,050	0,009	0,345	3,4	23,8
4	300	0,009	0,050	0,118	0,118	0,050	0,009	0,354	3,3	23,2
5	1000	0,009	0,050	0,118	0,118	0,050	0,009	0,354	3,3	23,2
6	300	0,009	0,050	0,118	0,118	0,050	0,009	0,354	3,3	23,2
7	600	0,009	0,050	0,118	0,118	0,050	0,000	0,345	3,4	23,8
8	900	0,009	0,050	0,118	0,118	0,000	0,000	0,295	3,7	26,0
9	1200	0,009	0,050	0,118	0,000	0,000	0,000	0,177	4,3	30,1

§ 99. Прежде чем перейти к дальнейшим расчетам, нужно обратить внимание на то, что суммарный коэффициент снижения дебита (столбец 9 табл. 9) для всех скважин, за исключением крайних, примерно один и тот же. Следовательно, и дебит всех скважин во взаимодействующем водозаборе, за исключением, конечно, крайних, будет один и тот же, если водообильность водоносного горизонта в отдельных его точках будет, примерно, одной и той же.

§ 100. Допустим, что в проектируемом нами водозаборе скважины № 1, 2, 3 и 4 будут иметь удельный дебит, равный удельному дебиту 1-й опытной скважины, и скважины № 5, 6, 7, 8 и 9—удельному дебиту 2-й скважины. Чтобы определить удельный дебит скважины с учетом влияния, нужно помножить удельный дебит на суммарный коэффициент снижения дебита. Результаты этих вычислений приведены в предпоследнем столбце табл. 9.

§ 101. Далее, уменьшенный на $(1-\Sigma \alpha)$ удельный дебит следует умножить на принятую при проектировании величину по-

нижения, в данном случае 7 м^1 ; это даст дебит скважины с учетом влияния (последний столбец табл. 9). Суммарный дебит всего водозабора будет равен $227,9 \text{ л/сек}$. На этом в большинстве случаев заканчивается весь расчет взаимодействующих буровых скважин по методу суммарного коэффициента снижения дебита.

§ 102. Допустим теперь, что мы пожелали бы ввести поправку на уменьшение срезок уровня. Для этого, зная величину срезки уровня, при расстоянии между скважинами в 200 м , нам необходимо вычислить ее для интересующих нас расстояний в $300, 600$ и 900 м , и затем вычислить для каждой скважины поправочный коэффициент, определяемый соотношением $\frac{S}{S + \Sigma t_i}$, где S —одно из понижений, которые были получены при одиночных откачках, и t —срезка уровня воды, соответствующая взятому для расчета понижению.

§ 103. Возьмем для расчета третье понижение, равное 5 м , при котором в соседней скважине, находящейся на расстоянии 200 м , наблюдалась срезка уровня в $0,69 \text{ м}$ (табл. 6).

По формулам, аналогичным тем, которыми мы пользовались для определения коэффициента снижения дебита для различных расстояний, находим, что срезка уровня на расстоянии в $300, 600$ и 900 м будет соответственно равна $t_{300} = 0,52 \text{ м}$, $t_{600} = 0,22 \text{ м}$ и $t_{900} = 0,04 \text{ м}$.

§ 104. Пользуясь приведенными выше данными, составляем такую же таблицу, какая была составлена для определения суммарного коэффициента снижения дебита (табл. 10).

Таблица 10

№ сква- жины	Рас- сто- яние m	Величина срезок уровня						Σt	$\frac{S}{S + \Sigma t}$	$(\Sigma \alpha)S$	л/сек				
		С одной стороны			С другой стороны										
		t_{900}	t_{600}	t_{300}	t_{300}	t_{600}	t_{900}								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
1	1200	0,00	0,00	0,00	0,52	0,22	0,04	0,78	0,865	0,154	30,4				
2	900	0,00	0,00	0,52	0,52	0,22	0,04	1,30	0,795	0,234	27,5				
3	600	0,00	0,22	0,52	0,52	0,22	0,04	1,52	0,765	0,264	26,4				
4	300	0,04	0,22	0,52	0,52	0,22	0,04	1,56	0,760	0,269	26,2				
5	000	0,04	0,22	0,52	0,52	0,22	0,04	1,56	0,760	0,269	26,5				
6	300	0,04	0,22	0,52	0,52	0,22	0,04	1,56	0,760	0,269	26,5				
7	600	0,04	0,22	0,52	0,52	0,22	0,00	1,52	0,765	0,264	26,6				
8	900	0,04	0,22	0,52	0,52	0,00	0,00	1,30	0,795	0,234	27,8				
9	1200	0,04	0,22	0,52	0,00	0,00	0,00	0,78	0,865	0,154	30,6				

Примечание. S равно 5 м .

1 Учитывая, что в данном случае зависимость $Q=f(S)$ прямолинейная.

§ 105. В результате введения поправки суммарный дебит увеличился до 248,5 л/сек, т. е., примерно, на 9,5%. Такой величиной поправки, как уже указывалось выше, можно во многих случаях пренебречь, особенно учитывая обычно незначительную продолжительность опытных откачек, благодаря чему в водоносном горизонте не достигается установившегося гидравлического состояния, и поэтому величина наблюдаемых срезок уровня воды фиксируется заниженной.

§ 106. Для расчета того же водозабора по методу суммарного коэффициента влияния нужно пересоставить табл. 9, учитывая, что коэффициент влияния равен единице минус коэффициент снижения дебита, равный $\beta(1-\alpha)$.

В результате этого пересчета получены данные, приведенные в табл. 11.

Таблица 11

№ скважин	Влияние						$\Sigma\beta$	$q \Delta\beta$ л/сек	$q \cdot S(\Delta\beta)$ л/сек			
	С одной стороны		С другой стороны									
	2	3	4	5	6	7						
1	1,000	1,000	1,000	0,882	0,950	0,991	0,830	4,25	29,8			
2	1,000	1,000	0,882	0,882	0,950	0,991	0,733	3,75	26,3			
3	1,000	0,950	0,882	0,882	0,950	0,991	0,696	3,57	25,0			
4	0,991	0,950	0,882	0,882	0,950	0,991	0,690	3,54	24,8			
5	0,991	0,950	0,882	0,882	0,950	0,991	0,690	3,58	25,1			
6	0,991	0,950	0,882	0,882	0,950	0,991	0,690	3,58	25,1			
7	0,991	0,950	0,882	0,882	0,950	1,000	0,696	3,61	25,3			
8	0,991	0,950	0,882	0,882	1,000	1,000	0,733	3,80	26,6			
9	0,991	0,950	0,882	1,000	1,000	1,000	0,830	4,30	30,1			

§ 107. В столбце 8 табл. 11 подсчитан суммарный коэффициент влияния путем умножения отдельных коэффициентов его, приведенных соответственно в столбцах 2, 3, 4, 5, 6 и 7 согласно формуле (128). В столбце 9 определен уменьшенный на суммарный коэффициент влияния удельный дебит скважин, причем для первых четырех он принят равным 5,12 л/сек, а для остальных пяти—5,18 л/сек. В столбце 10 вычислен дебит каждой скважины в отдельности с учетом влияния. Суммарный дебит водозабора, подсчитанный по методу суммарного коэффициента влияния, равен 238,1 л/сек. Этот дебит несколько больше дебита, полученного по методу суммарного коэффициента снижения дебита, и меньше, чем по тому же методу с поправкой на суммарное влияние.

§ 108. Перейдем к примеру, иллюстрирующему решение второй, встречающейся в практике, задачи по методу суммарной срезки. Возьмем четыре взаимодействующие скважины, пробуренные на артезианский водоносный горизонт, сложенный разнозер-

нистыми песками. Расположение этих скважин показано на рис. 21, одна из них (4) была введена в эксплуатацию еще до начала опытных откачек.

§ 109. По количеству откачиваемой воды из скважины № 4 и по понижениям уровня воды в остальных трех скважинах были определены следующие удельные дебиты по срезке (отношение дебита данной скважины к понижению в наблюдаемой): для скважины № 2 — 5,46 л/сек, для скважины № 5 — 7,44 л/сек и для скважины № 3 — 6,71 л/сек. После этого были проведены одиночные откачки из остальных скважин, без прекращения откачки из эксплуатационной скважины № 4. Результаты этих наблюдений приведены в табл. 12.

Рис. 21.

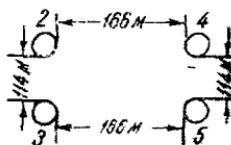


Таблица 12

№ скважины	Продолжительность откачки в часах	Опытная скважина		Понижение м в скважинах			Дебит эксплуатационной скважины № 4 л/сек
		Дебит л/сек	Понижение м	№ 2	№ 5	№ 3	
1	2	3	4	5	6	7	8
3	73	2,16	3,50	0,71	0,65	—	3,5
	72	3,46	5,45	0,96	1,00	—	3,5
	122	4,80	7,45	1,36	1,60	—	3,4
2	74	1,40	3,56	—	0,75	0,80	3,4
	71	2,30	5,53	—	0,90	0,95	3,4
	120	3,37	7,53	—	1,05	1,05	3,2
5	70	0,75	3,65	0,58	—	0,45	3,1
	72	1,07	5,65	0,83	—	0,70	3,5
	119	1,50	7,65	0,88	—	0,80	3,6

§ 110. Так как в период производства одиночных откачек одновременно происходила откачка воды с переменным дебитом из эксплуатируемой скважины № 4, то, очевидно, нами были зафиксированы преувеличенные понижения во всех остальных скважинах. Поэтому для определения величины понижений, которые создавались бы в результате одиночных откачек, необходимо ввести поправки на откачуку воды из скважины № 4. Для этого дебит этой скважины, наблюдавшийся при производстве одиночных откачек, следует разделить на соответствующий средний удельный дебит по срезке и полученную величину, представляющую понижение, создаваемое за счет откачки воды из скважины № 4, вычесть из понижений, наблюдавшихся в процессе одиночных откачек. Например, при откачке из скважины № 3 для первого понижения и при дебите скважины № 4 — 3,5 л/сек мы получим следующие величины поправок: для скважины № 3 —

$\frac{3,5}{6,71} = 0,52 \text{ м}$, для скважины № 2 — $\frac{3,5}{5,46} = 0,64 \text{ м}$ и для скважины № 5 — $\frac{3,5}{7,44} = 0,47 \text{ м}$. Следовательно, действительные понижения при одиночной откачке из скважины № 3 при дебите ее $2,16 \text{ л/сек}$ будут равны для скважины № 3 — $3,50 - 0,52 = 2,98 \text{ м}$, а действительные срезки уровня воды для скважины № 2 — $0,71 - 0,64 = 0,07 \text{ м}$ и для скважины № 5 $0,65 - 0,47 = 0,18 \text{ м}$. Таким путем нужно ввести поправки для всех скважин и для всех понижений. В результате мы получим действительные понижения, которые наблюдались бы при одиночных откачках и при отсутствии откачки из эксплоатируемой скважины № 4.

§ 111. Упоминаемые в предыдущем параграфе данные приведены в табл. 13.

§ 112. Из данных табл. 13 (столбец удельных дебитов) следует, что для рассматриваемого случая мы имеем дело с прямолинейной зависимостью дебита от понижения.

§ 113. Чтобы во всех скважинах иметь, примерно, одинаковое понижение, проектное количество воды следует распределить пропорционально удельным дебитам скважин, согласно формуле $Q = \frac{Q_0 q_i}{\Sigma q}$, где

Q_0 — проектное количество воды, q_i — удельный дебит скважины, для которой определяется проектное количество воды, и Σq — сумма удельных дебитов.

В данном случае проектное количество воды равно 25 л/сек , а сумма удельных дебитов всех скважин равна $0,71 + 0,48 + 0,22 + 0,84 = 2,25 \text{ л/сек}$. Отсюда на каждую скважину можно дать следующую водную нагрузку:

$$\begin{aligned} \text{для скважины № 3 } Q_3 &= \frac{25}{2,25} \times 0,71 = 7,90 \text{ л/сек}, \\ " \quad \text{№ 2 } Q_2 &= \frac{25}{2,25} \times 0,48 = 5,33 \quad " \\ " \quad \text{№ 5 } Q_5 &= \frac{25}{2,25} \times 0,22 = 2,44 \quad " \\ " \quad \text{№ 4 } Q_4 &= \frac{25}{2,25} \times 0,84 = 9,33 \quad " \end{aligned}$$

§ 114. Зная дебит каждой скважины, мы можем по удельным дебитам их и удельным дебитам по срезке подсчитать суммарные понижения. Например, для скважины № 3 при проектном дебите ее $7,90 \text{ л/сек}$ понижение в ней будет равно:

$$S_3 = \frac{Q_3}{q_3} = \frac{7,90}{0,71} = 11,11 \text{ м.}$$

Кроме того, в результате откачки воды из скважины № 2 в количестве $5,33 \text{ л/сек}$ в скважине № 3 будет создано дополнительное понижение

Таблица 13

№ скважины	Дебит Понижение			Удельный дебит q_8	Понижение m в скважинах				Удельные дебиты по срезке л/сек в скважинах			
	Q_3	S_3			№ 2	№ 5	№ 3	№ 4	№ 2	№ 5	№ 3	№ 4
	1	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11
3	2,16 3,46 4,80	2,98 4,93 6,94	0,72 0,70 0,69	0,07 0,32 0,70	0,18 0,53 1,15	— — —	0,45 0,85 1,00	— 10,80 6,85	— 6,53 5,35	— — —	— 4,07 4,80	— — —
	Средний удельный дебит 0,70			—	—	—	—	8,82	—	—	—	4,43
	Q_2	S_2	q_2	—	—	—	—	—	q_{25}	q_{23}	q_{24}	—
2	1,40 2,30 3,37	2,94 4,91 6,94	0,48 0,47 0,49	— — —	0,30 0,45 0,62	0,29 0,44 0,57	0,30 0,45 0,62	— — —	4,67 5,12 5,43	4,83 5,22 5,91	4,67 5,12 5,43	— — —
	Средний удельный дебит 0,48			—	—	—	—	—	5,07	5,32	5,07	—
	Q_5	S_5	q_5	—	—	—	—	—	q_{52}	—	q_{53}	q_{54}
5	0,75 1,07 1,50	3,24 5,18 7,17	0,29 0,21 0,21	0,02 0,19 0,22	— — —	0,01 0,18 0,26	0,00 0,18 0,25	— 5,63 6,78	— — —	5,95 5,77	5,95 5,77	— — —
	Средний удельный дебит 0,24			—	—	—	—	6,21	—	5,86	5,86	—
	Q_4	S_4	q_4	—	—	—	—	—	q_{42}	q_{45}	q_{43}	—
4	3,26 5,11 5,19	4,00 5,95 6,08	0,81 0,86 0,85	0,53 1,13 1,20	0,40 0,80 0,97	0,45 0,85 1,00	— — —	6,15 4,52 4,32	8,15 6,38 5,35	7,25 6,02 5,19	— — —	— — —
	Средний удельный дебит 0,84			—	—	—	—	—	5,00	6,63	6,15	—

Примечания. 1 Удельным дебитам по срезке для удобства следует давать двойную индексировку, причем первый индекс означает номер скважины, дебит которой делится на срезку уровня воды, а второй — по которому берется

резка уровня воды. Например q_2 , означает, что дебит второй скважины разделен на соответствующую срезку уровня воды в третьей скважине.

2 Подсчитывать удельные дебиты по срезке для понижения менее 15–30 см не следует, так как эти величины, по сути дела, выходят за пределы погрешностей подсчетов и наблюдений.

3 Так как специальных наблюдений за величиной понижения в эксплуатируемой скважине № 4 при одиночных откачках не производилось, то величину срезки уровня для этой скважины приходится брать по аналогии, полагая, что при равных дебитах и равных расстояниях между скважинами должны быть и равные срезки уровня воды. В данном случае, например, принято, что скважина № 3 также влияет на скважину № 4, как последняя влияет на скважину № 3. Обычно имея группу взаимодействующих скважин, примерно аналогичные условия влияния можно подобрать в большинстве случаев

тельное понижение, равное дебиту скважины № 2, деленному на соответствующий удельный дебит по срезке q_{23} , т. е.:

$$t_2 = \frac{Q_2}{q_{23}} = \frac{5,33}{5,32} = 1,00 \text{ м.}$$

Аналогично под влиянием откачки из скважин № 5 и 4 в скважине № 3 будут созданы дополнительные понижения, равны

$$t_3 = \frac{Q_5}{q_{53}} = \frac{2,44}{5,86} = 0,41 \text{ м} \quad \text{и} \quad t_4 = \frac{Q_4}{q_{43}} = \frac{9,33}{6,15} = 1,52 \text{ м.}$$

Отсюда суммарное понижение в скважине № 3 при откачке из нее 7,90 л/сек и при влиянии других скважин равно $\Sigma S = 11,11 + 1,0 + 0,41 + 1,52 = 14,04 \text{ м}$. Аналогично можно подсчитать суммарное понижение и для других скважин. Результаты этих подсчетов приведены в табл. 14.

Таблица 14

№ скважин	Дебит л/сек	Понижение м	Понижение от других скважин при дебите их				ΣS м	
			скважины					
			№ 3	№ 2	№ 5	№ 4		
1	2	3	4	5	6	7	8	
3	7,90	11,11	—	1,00	0,41	1,52	14,04	
2	5,33	11,11	0,90	—	0,39	1,87	14,27	
5	2,44	11,11	1,33	1,05	—	1,41	14,90	
4	9,33	11,11	1,73	1,05	0,41	—	14,30	
Σ	25,00							

§ 115. Из рассмотрения данных, приведенных в табл. 14, следует, что скважина № 5 имеет очень малый дебит и наиболь-

шее понижение. Кроме того, под влиянием откачки из нее мы теряем в других скважинах количество воды, равное срезке уровня, умноженной на удельный дебит каждой скважины ($0,41 \times 0,71 + 0,39 \times 0,48 + 0,41 \times 0,84 = 0,32$ л/сек). Очевидно скважину № 5 эксплуатировать нецелесообразно, так как она может дать только $2,44 - 0,82 = 1,62$ л/сек. Рациональнее несколько увеличить понижение и получить все потребное количество воды, равное 25 л/сек, только из трех скважин № 3, 2 и 4.

§ 116. Для этих скважин необходимо вновь произвести аналогичный подсчет, результаты которого приведены в табл. 15.

Таблица 15

№ скважин	Дебит л/сек	Понижение м	Понижение от других скважин при дебите их			ΣS м	
			скважины				
			№ 3	№ 2	№ 4		
			8,75 л/сек	5,9 л/сек	10,35 л/сек		
3	8,75	12,3	—	1,11	1,68	15,09	
2	5,90	12,3	0,99	—	2,07	15,36	
4	10,35	12,3	1,92	1,16	—	15,38	
Σ	25,00						

Этим заканчивается расчет данной группы взаимодействующих скважин.

§ 117. Приведем еще один пример расчета таких скважин по методу суммарной срезки и подчеркнем еще раз, что этот метод применим только при условии, когда движения подземного потока подчиняются закону Дарси.

Из десяти скважин водозабора, сооруженного для водоснабжения одного из городов, расположенных на южном крыле подмосковной котловины, одновременно из четырех скважин одиночными и групповой откачками были опробованы скважины № 69, 70, 71 и 72.

На этом участке напорный подземный поток приурочен к трещиноватым известнякам мощностью от 7 до 20 м. Водоносные известняки покрыты аллювиальными отложениями, представленными линзами кремневого щебня, черноватой глиной мощностью около 12 м, выше которой идет пестрый комплекс глинистых пород мощностью 4—5 м. Откачка производилась центробежными насосами, приводимыми в движение электромоторами. Некоторые основные данные по скважинам № 69, 70, 71 и 72 приведены в табл. 16.

§ 118. Данные одиночных откачек, при которых велись наблюдения за величиной срезки уровня воды в этих скважинах, и весь ход расчета по методу суммарной срезки приведены в табл. 17

Таблица 16

№ скважины	Глубина скважин м	Столб воды м	Конечный диаметр м.и.	Длина перфорированных труб, м	Примечание	
69	33,73	32,13	250	9,15		
70	39,20	37,80	250	17,03		
71	39,40	38,50	250	25,20		
72	34,52	34,20	250	16,46		

Таблица 17

№ скважины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	№ 69	№ 70	№ 71	№ 72	$(\Sigma f)_3$	$(\Sigma f)_5$	$S - (\Sigma f)_6$	q л/сек	Q л/сек	ΣQ л/сек
69	—	0,08	0,48	0,35	0,91	1,52	3,48	2,9	10,1	—
70	0,73	—	0,58	0,53	1,84	3,08	1,92	7,1	13,6	—
71	0,57	0,38	—	0,48	1,43	2,38	2,62	22,2	58,2	101,8
72	0,04	0,31	0,62	—	0,97	1,62	3,38	5,9	19,9	—

§ 119. В первых четырех столбцах табл. 17 приведены срезки уровня воды, которые наблюдались при одиночных откачках из этих четырех скважин при среднем понижении 3 м. При этом в горизонтальных строчках указаны величины срезки уровня для каждой скважины от откачки воды из остальных трех (горизонтально направленная стрелка). Например, при откачке воды из скважины № 70 срезка уровня в скважине № 69 равнялась 0,08 м, при откачке из скважины № 71 в той же скважине срезка уровня была 0,48 м и т. д. В вертикальных столбцах (стрелка, направленная вниз) указаны срезки, которые получились во всех скважинах при откачке из данной скважины. Например, при откачке воды из скважины № 69 срезка уровня в скважине № 70 равнялась 0,73 м, в скважине № 71 — 0,57 и в скважине № 72 — 0,04 м.

§ 120. В столбце 5 той же таблицы для каждой скважины в отдельности просуммированы срезки уровня. Индекс 3, поставленный у выражения (Σf) , означает, что эта сумма срезок действительна для понижения в 3 м.

§ 121. Зададимся какой-нибудь другой величиной понижения, но одинаковой для всех четырех скважин. Величина этого понижения может обусловливаться или типом насосов, или требующимся количеством воды. Так как мы задаемся величиной понижения, а не дебитом, то этот способ расчета можно было бы назвать методом суммарной срезки при заданном понижении.

Здесь полезно вспомнить пример расчета по методу суммарной срезки при заданном дебите.

§ 122. В данном случае зададимся, например, понижением в 5 м. Если бы подсчитанный при этом понижении суммарный расход оказался меньшим потребного количества воды, то для расчета необходимо было бы взять большее понижение, например в 7,8 или 10 м, и весь расчет повторить для вновь принятого расчетного понижения. Наоборот, если бы суммарный расход по условиям питания и по другим геолого-гидрогеологическим соображениям получился преувеличенным, то, естественно, расчетную величину понижения следовало бы взять меньшей, например, в 4 или даже в 3 м.

§ 123. Ввиду того, что в данном случае откачки производили только с двумя понижениями и, следовательно, они не выяснили зависимостей $Q=f(S)$ и $Q=\varphi(t)$, то для нашего расчета, приводимого в качестве примера, последние примем прямолинейными.

§ 124. Поэтому для получения суммарной срезки уровня воды при 5 м необходимо срезку, действительную для 3 м, умножить на отношение 5:3, т. е. на 1,67. Величина суммарной срезки, подсчитанная этим путем для понижения в 5 м (Σt)₅, указана в столбце шестом табл. 17.

§ 125. Подсчитаем теперь разность между расчетным понижением в 5 м и суммарной срезкой (Σt)₅ для каждой скважины в отдельности; это даст нам величину понижения, которая с учетом влияния может обеспечить тот или иной расход данной скважины. Эти понижения, т. е. разность между 5 м и (Σt)₅, приведена в столбце седьмом той же таблицы.

§ 126. В восьмом столбце приведены удельные дебиты скважин, полученные при одиночных откачках.

§ 127. Помножив удельные дебиты на величину „рабочей“ части заданного понижения, получим дебит каждой скважины с учетом влияния. Следовательно, цифры девятого столбца табл. 17 являются результатом умножения q на [5 — (Σt)₅], т. е. цифры восьмого столбца на цифры седьмого. Суммарный расход всех четырех скважин получился равным 101,7 л/сек.

§ 128. Если бы аналогичный расчет провести для понижения в 3 м, то в столбце седьмом мы должны были бы вычесть из понижения в 3 м суммарную срезку, действительную для этого понижения, т. е. цифры пятого столбца. При понижении в 3 м суммарный дебит получается равным 61,3 л/сек, фактически же при групповой откачке из всех четырех скважин был получен суммарный расход в 60,87 л/сек при следующих понижениях: в скважине № 69 — 3,2 м, в скважине № 70 — .8 м, в скважине № 71 — 1,83 м и в скважине № 72 — 3,16 м. Так как в наиболее водообильной скважине № 71 понижение было 1,83 м, а не 3 м, как это было принято при расчете, то очевидно, суммарный дебиг при увеличении понижения в этой скважине до 3 м был бы несколько большим, чем 60,87 л/сек. Следовательно, по подсчетам в дан-

ном случае мы получили преуменьшенную цифру суммарного дебита.

§ 129. В действительности так же, как и для суммарного коэффициента снижения дебита, мы должны были бы внести поправку на уменьшение срезок уровня при взаимодействии четырех скважин, т. е. (Σt_3) умножить на $\frac{S}{S+(\Sigma t)_3}$. В данном случае мы этого не учитывали ввиду кратковременности одиночных откачек, благодаря чему при наблюдениях, вероятно, были зафиксированы преуменьшенные срезки уровня.

§ 130. Для иллюстрации приведем расчет с введением этой поправки (см. табл. 18).

Таблица 18

1	2	3	4	5	6	7	8
№ сква- жины	$(\Sigma t)_3$	$\frac{S}{S+(\Sigma t)_3}$	$\frac{(\Sigma t)_3 \cdot S}{S+(\Sigma t)_3}$	$\frac{3-(St)_3 S}{S+(\Sigma t)_3}$	$l/сек$	Q $l/сек$	$-Q$
69	0,91	0,767	0,70	2,30	2,9	6,7	—
70	1,84	0,620	1,14	1,86	7,1	13,2	—
71	1,43	0,679	0,97	2,03	22,2	45,0	78,3
72	0,97	0,755	0,74	2,26	5,9	13,4	—

§ 131. Как видно из табл. 18, суммарный расход, благодаря введению поправки, увеличился на 17 $l/сек$, т. е. на 27,7%. Во втором столбце этой таблицы приведена величина суммарных срезок, действительных для 3 m , и взятых из пятого столбца табл. 17.

В третьем столбце подсчитан поправочный коэффициент при расчетном понижении 3 m , т. е. выражение $\frac{S}{S+(\Sigma t)_3}$ в данном случае равно $\frac{3}{3+(\Sigma t)_3}$.

В столбце пятом подсчитана „рабочая часть“ понижения путем вычитания из 3 m исправленной величины суммарной срезки.

В столбце 6 указан удельный дебит, в столбце 7 — дебит каждой скважины в отдельности и в столбце 8 — суммарный дебит всех четырех скважин.

Как видно из приведенных примеров, техника расчета взаимодействующих скважин очень не сложна, особенно в том случае, когда мы имеем дело с прямолинейными зависимостями.

§ 132. Приведем пример расчета взаимодействующих скважин с разными понижениями. Допустим, что при опытной откачке нами установлено, что удельный дебит равен 2 $l/сек$ и срезки уровня воды в опытных скважинах, расположенных на расстоянии 200 m , оказались равными $t_1 = 1 m$ и $t_2 = 0,1 m$ при пони-

жениях в скважинах $S_1 = 2 \text{ м}$ и $S_2 = 20 \text{ м}$. На основании этих данных нам нужно определить дебит водозабора, состоящего из четырех скважин, расположенных на расстоянии 200 м друг от друга со следующими запроектированными понижениями: в первой скважине — 5 м, во второй — 20 м, в третьей — 15 м и в четвертой — 10 м. Радиус влияния равен 1000 м.

§ 133. Определяем сначала коэффициент снижения дебита для равных понижений и для расстояния между скважинами в 200 м. Для простоты подсчетов приближенно подсчитаем его величину по простейшим формулам:

$$\alpha = \frac{t_1}{S_2} = \frac{t_2}{t_1} = \frac{1}{20} = 5\%.$$

§ 134. Суммарный коэффициент снижения дебита для первой скважины согласно формуле (86) будет равен:

$$\Sigma \alpha_1 = 5\% \cdot \frac{20}{5} + 5\% \cdot \frac{15}{5} = 5\% \cdot \frac{\lg \frac{1000}{400}}{\lg \frac{1000}{200}} + 5\% \cdot \frac{10}{5} = 5\% \cdot \frac{\lg \frac{1000}{600}}{\lg \frac{1000}{200}} = 32,2\%.$$

Аналогично для второй скважины

$$\Sigma \alpha_2 = 5\% \cdot \frac{5}{20} + 5\% \cdot \frac{15}{20} + 5\% \cdot \frac{10}{20} = 5\% \cdot \frac{\lg \frac{1000}{400}}{\lg \frac{1000}{200}} = 6,4\%.$$

Поправки на разные понижения для второй скважины вводим только для учета влияния четвертой скважины, отстоящей от опытной на 400 м, так как первая и третья удалены от второй на 200 м, для которых коэффициент снижения дебита равен 5%.

Для третьей скважины суммарный коэффициент снижения дебита равен:

$$\Sigma \alpha_3 = 5\% \cdot \frac{5}{15} \cdot \frac{\lg \frac{1000}{400}}{\lg \frac{1000}{200}} + 5\% \cdot \frac{20}{15} + 5\% \cdot \frac{10}{15} = 10,9\%;$$

наконец, для четвертой скважины:

$$\Sigma \alpha_4 = 5\% \cdot \frac{5}{10} \cdot \frac{\lg \frac{1000}{600}}{\lg \frac{1000}{200}} + 5\% \cdot \frac{20}{10} \cdot \frac{\lg \frac{1000}{400}}{\lg \frac{1000}{200}} + 5\% \cdot \frac{15}{10} = 14,1\%.$$

§ 135. Дебиты скважин при удельном дебите $q = 2 \text{ л/сек}$ будут равны:

$$Q_1 = q \cdot S_1 (1 - \Sigma \alpha_i) = 2 \cdot 5 (1 - 0,322) = 6,8 \text{ л/сек},$$

$$Q_2 = q \cdot S_2 (1 - \Sigma \alpha_i) = 2 \cdot 20 (1 - 0,064) = 37,6 \text{ л/сек},$$

$$Q_3 = q \cdot S_3 (1 - \Sigma \alpha_i) = 2 \cdot 15 (1 - 0,109) = 26,7 \text{ л/сек},$$

$$Q_4 = q \cdot S_4 (1 - \Sigma \alpha_i) = 2 \cdot 10 (1 - 0,141) = 17,2 \text{ л/сек}.$$

Итого по всем четырем скважинам удельный дебит будет равен 88,3 л/сек.

ГЛАВА IV

РАСЧЕТ ВЗАЙМОДЕЙСТВУЮЩИХ ГРУНТОВЫХ КОЛОДЦЕВ

I. Основные формулы

§ 136. Для расчета взаимодействующих грунтовых колодцев в настоящее время имеется единственный метод, предложенный Форхгеймером, дополненный и уточненный Кирилесом, Зихардтом и другими.

§ 137. Метод Форхгеймера применяется, главным образом, для расчета различного рода водопонизительных установок при гражданском и промышленном строительствах, при осушении горных выработок и, в меньшей мере, для расчета водозаборных сооружений.

§ 138. Метод Форхгеймера допускает расчет любого количества взаимодействующих скважин, любым образом расположенных в плане, и не связан с какой-либо фиксированной формой контура области питания, за исключением водопонизительных установок, работающих вблизи рек и озер и удаленных от последних на расстояние, меньшее половины радиуса влияния. Поскольку метод Форхгеймера не связан с фиксированной формой контура питания, это дает основание В.Н. Щелкачеву считать его формулы только приближенным решением задачи о взаимодействующих скважинах.

§ 139. Общий расход всех скважин, входящих в состав данной группы взаимодействующих грунтовых колодцев, определяется по следующей формуле Форхгеймера:

$$Q = \frac{\pi K (2H - S) S}{\ln R - \frac{1}{n} \ln(x_1 x_2 \dots x_n)}, \quad (135)$$

где H — мощность грунтового потока, S — заданное, минимально необходимое понижение в центре водопонизительной установки, K — коэффициент фильтрации, R — радиус влияния и $x_1 x_2 \dots x_n$ — расстояния от скважин до центра водопонизительной установки.

§ 140. Уровень воды в любой точке водносного слоя, находящейся в пределах действия данной водопонизительной установки,

может быть определен по следующей формуле Форхгеймера:

$$y = \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K} \left(\ln R - \frac{1}{n} \ln(x_1 x_2 \dots x_n) \right)}, \quad (136)$$

где y — высота уровня в интересующей точке водоносного слоя и $x_1 x_2 \dots x_n$ — расстояния от этой точки до каждой скважины, остальные обозначения прежние.

§ 141. Удельная водопропускная способность скважин на каждый погонный метр длины смачиваемой части фильтра определяется по формуле Зихардта:

$$\varphi = 2\pi r \frac{\sqrt{K}}{15}, \quad (137)$$

где r — радиус колодца и K — коэффициент фильтрации.

§ 142. Максимально возможное понижение при заданном расположении и числе колодцев определяется по формуле:

$$S_{max} = H - \sqrt{\left(H^2 + A + \frac{1}{2u^2}\right)} - \sqrt{A^2 + \frac{u^2 + A^2}{u^2} + \left(\frac{1}{2u^2}\right)^2},$$

где

$$A = \frac{C}{u}; \quad C = i_o r \ln \lambda; \quad u = \frac{\lambda}{2R_o i_o \ln \frac{R}{R_o}}, \quad (138)$$

$$i_o = \frac{1}{15\sqrt{R}}; \quad \lambda = \frac{b}{2\pi r};$$

b — расстояние между колодцами, измеренное по дуге окружности равновеликого круга с радиусом R_o .

§ 143. Глубина колодцев, не достигающих водоупора, при заданном радиусе R_o водопонизительной установки определяется по формуле:

$$h = h_1 + S + y_{min}, \quad (139)$$

где h — глубина колодцев от поверхности земли, h_1 — глубина залегания грунтовых вод от поверхности земли, S — заданное понижение и

$$y_{min} = \frac{2u^2 S^3 + 2uCS}{1 - 4u^2 S^2} + \sqrt{\frac{u^2 S^4 + 2uCS^2}{1 - 4u^2 S^2} + \left(\frac{2u^2 S^3 + 2uCS}{1 - 4u^2 S^2}\right)^2} \quad (140)$$

Обозначения данной формулы приведены в § 142 (см. формулу 138).

§ 144. Для расчета ряда скважин, расположенных параллельно берегу реки, питающей данный грунтовый поток, можно пользоваться формулой Форхгеймера:

$$y^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi K} \left(\ln 2l - \frac{1}{n} \ln x_1 x_2 \dots x_n \right), \quad (141)$$

где y — высота уровня воды в любой точке грунтового потока между берегом реки и рядом скважин, H — высота уровня грунтовой воды у уреза реки, Q — общий расход, l — расстояние центра ряда скважин от берега реки и $x_1 x_2 \dots x_n$ — расстояния от каждой скважины до точки, в которой уровень воды равен y .

§ 145. Для определения высоты уровня воды в точках грунтового потока, лежащего за пределами ряда скважин, идущих параллельно берегу реки, а также для более точного определения той же величины в точках, лежащих между рекой и скважинами, можно применять формулу Форхгеймера:

$$y^2 = H^2 - \frac{g}{\pi K} (\ln z_1 z_2 \dots z_n - \ln x_1 x_2 \dots x_n), \quad (142),$$

где q — дебит каждой скважины в отдельности, $z_1 z_2 \dots z_n$ — расстояния точки N от воображаемого в реке ряда скважин,

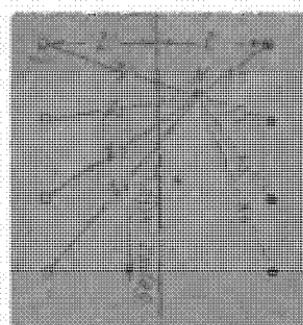


Рис. 22.

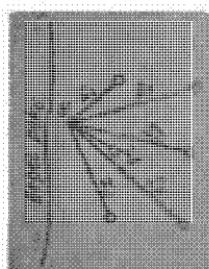


Рис. 23.

расположенных на том же расстоянии l , что и проектируемый ряд скважин, $x_1 x_2 \dots x_n$ — расстояния той же точки от скважин проектируемого ряда (рис. 22).

Формулу (142) можно применять и для расчета двух рядов скважин, расположенных параллельно берегу реки, если под $z_1 z_2 \dots z_n$ подразумевать расстояния точки от скважин дальнего ряда и $x_1 x_2 \dots x_n$ — расстояния той же точки от скважин ближнего ряда (рис. 23).

§ 146. Если со стороны водораздела к ряду скважин, расположенных параллельно берегу реки, дополнительно будет притекать грунтовый поток с единичным расходом q_o , то для расчетов следует воспользоваться формулой:

$$y^2 = H^2 + \frac{2q_o l}{K} - \frac{q}{\pi K} (\ln z_1 z_2 \dots z_n - \ln x_1 x_2 \dots x_n), \quad (143)$$

где l — расстояние точки от берега по перпендикулярному к ней направлению; остальные обозначения прежние.

§ 147. Дебиты понижения и расстояния между грунтовыми колодцами, расположенными в один ряд, можно определить путем решения следующей системы уравнений, составляемых так же, как и для артезианских скважин (см. § 33), с той только разницей, что в левой части уравнений вместо S будет стоять выражение $(2H - S)S$:

$$(2H - S_1)S_1 = \frac{1}{\pi K} \left(Q_1 \ln \frac{R}{r} - Q_2 \ln \frac{R}{x_{1-2}} - Q_3 \ln \frac{R}{x_{1-3}} - \dots - Q_n \ln \frac{R}{x_{1-n}} \right)$$

$$(2H - S_2)S_2 = \frac{1}{\pi K} \left(Q_1 \ln \frac{R}{x_{2-1}} - Q_2 \ln \frac{R}{r} - Q_3 \ln \frac{R}{x_{2-3}} - \dots + Q_n \ln \frac{R}{x_{2-n}} \right)$$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} \cdot & \cdot \\ \cdot & ; & \cdot \\ (2H - S_n)S_n = \frac{1}{\pi K} \left(Q_1 \ln \frac{R}{x_{n-1}} - Q_2 \ln \frac{R}{x_{n-2}} - Q_3 \ln \frac{R}{x_{n-3}} - \dots - Q_n \ln \frac{R}{r} \right), \end{array}$$

где R — радиус кругового контура питания.

Наконец, в случае расположения грунтовых колодцев параллельно берегу реки, находящейся в гидравлической связи с грунтовым потоком, дебиты, понижения и расстояния между грунтовыми колодцами можно найти, решая следующую систему уравнений:

$$(2H - S_1)S_1 = \frac{1}{\pi K} \left(Q_1 \ln \frac{2l}{r} + Q_2 \ln \frac{l_{II-1}}{x_{2-1}} + Q_3 \ln \frac{l_{III-1}}{x_{3-1}} + \dots + Q_n \ln \frac{l_{III-n}}{x_{n-1}} \right),$$

$$(2H - S_2)S_2 = \frac{1}{\pi K} \left(Q_1 \ln \frac{l_{I-2}}{x_{1-2}} + Q_2 \ln \frac{2l}{r} + Q_3 \ln \frac{l_{III-2}}{x_{3-2}} + \dots + Q_n \ln \frac{l_{N-2}}{x_{n-2}} \right),$$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} \cdot & \cdot \\ \cdot & ; & \cdot \\ (2H - S_n)S_n = \frac{1}{\pi K} \left(Q_1 \ln \frac{l_{I-n}}{x_{1-n}} + Q_2 \ln \frac{l_{II-n}}{x_{2-n}} + Q_3 \ln \frac{l_{III-n}}{x_{3-n}} + \dots + Q_n \ln \frac{2l}{r} \right), \end{array}$$

где $2l$ — расстояние между рассчитываемым и воображаемым рядами грунтовых колодцев, расположенных параллельно берегу

реки и на том же от него расстоянии l , что и рассчитываемый ряд (рис. 24); l_{n-1} , x_{2-n} и т. д. означают соответствующие расстояния между колодцами рассчитываемого и воображаемого рядов грунтовых колодцев.

В двух приведенных выше системах уравнений нужно задаваться двумя любыми из трех величин (дебит, понижение и расстояния) и путем решения уравнений находить третье.

2. Расчет водопонизительных установок по методу Форхгеймера

§ 148. При расчете водопонизительных установок определяются:

а) суммарный дебит водопонизительной установки, при котором обеспечивается заданное понижение уровня грунтовых вод в пределах строительного контура, и

б) необходимые число и глубина колодцев, обеспечивающие извлечение подсчитанного суммарного дебита водопонизительной установки при минимальных затратах средств.

§ 149. Задаваясь запроектированным понижением в центре водопонизительной установки по формуле (135), определяют суммарный дебит всех скважин. Если скважины не доводятся до водоупора („несовершенные колодцы“), то вычисленный по формуле (135) дебит, по рекомендации Кириллеса, увеличивается на 10—20 %.

§ 150. Для первоначальных подсчетов дебита величину $\frac{1}{n} \ln x_1 x_2 \dots$ в формуле (135) для упрощения заменяют величиной:

$$\ln R_o = \ln \sqrt{\frac{F}{\pi}}, \quad (144)$$

где F — площадь, оконтуриваемая водопонизительной установкой, и R_o — радиус равновеликого ей круга.

§ 151. Далее по формуле (137) определяется удельная водопропускная способность колодцев на каждый погонный метр смоченной части фильтра.

§ 152. Число необходимых скважин и их глубина определяются путем подбора при одновременном решении следующих двух уравнений:

$$y_0 h = \frac{Q}{\varphi}, \quad (145)$$

$$y_0 = \sqrt{y^2 - \frac{Q}{\pi K n} \ln \frac{R_o}{nr}}, \quad (146)$$

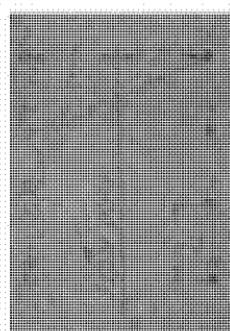


Рис. 24.

где n — число скважин, y_0 — длина смоченной части фильтра φ — удельная водопропускная способность на 1 пог. м смоченной части фильтра, Q — суммарный расход скважин, y — уровень воды в центре круга с радиусом R .

Так как n может быть только целым числом, то при окончательном выборе числа скважин необходимо соблюдать следующие два условия:

$$n = y_0 \geq \frac{Q}{\varphi} \quad \text{и} \quad (n - 1)y_0 < \frac{Q}{\varphi},$$

§ 153. Величина прыжка или разрыва уровня воды Δh у стенок скважин определяется по эмпирической формуле Эренбергера:

$$\Delta h = h - h_1 = 0,5 \cdot \frac{(H - h_1)^2}{H},$$

где h — уровень воды у внешней стенки колодца и h_1 — уровень воды внутри колодца.

§ 154. Радиус влияния для водопонизительных установок определяется обычно по формуле Кусакина:

$$R = 575 S \sqrt{KH}, \quad (148)$$

или по формуле Зихардта;

$$R = 3000 S \sqrt{K}, \quad (149)$$

где H — мощность грунтового потока, S — понижение и K — коэффициент фильтрации в $m/\text{сек}$.

Следует отметить, что формулы (148) и (149) не точны, поэтому в случае расчета водопонизительных установок лучше ориентироваться на опытные данные.

§ 155. Приведенными выше расчетами заканчивается приближенное решение задачи о взаимодействующих грунтовых колодцах по методу Форхгеймера. Далее найденное число скважин располагают в плане и производят некоторые уточнения и проверку полученного решения; это в основном сводится к уточнению, при определенном приближенным путем числе и расположении скважин, величины суммарного дебита, уровня воды в отдельных точках окруженного скважинами участка и уровня воды у внешних стенок обсадных труб или фильтров.

Кроме того, путем изменения числа и глубины скважин подбирается такое решение, которое дает наименьшие денежные затраты, в основном определяемые минимальным метражем буревых работ.

Как производится дополнительная проверка найденного приближенным путем решения, будет показано на приводимых ниже примерах расчета взаимодействующих грунтовых колодцев.

§ 156. При расположении взаимодействующих грунтовых колодцев вблизи (примерно менее $\frac{R}{r}$) рек и озер определяется:

а) их суммарный дебит, при котором в пределах определенной

площади поддерживается заданное понижение уровня грунтовых вод, и

б) расстояние между колодцами.

§ 157. При относительно небольшом расстоянии между скважинами (не более 20—30 м) и при расположении их вдоль берега примерно по одной прямой или ломаной линии общий приток воды к ним можно приравнять притоку в открытой дренажной канаве и вычислить его (по Форхгеймеру) по следующей формуле:

$$Q_{y\partial} = \frac{(H^2 - y^2)K + 2q_0 b}{2b}, \quad (150)$$

где $Q_{y\partial}$ — приток воды на 1 пог. м длины линии скважин, H — высота уровня воды у реки и y — высота уровня воды по середине между скважинами, q_0 — единичный приток (на 1 пог. м) грунтовых вод к скважинам со стороны водораздела (если, конечно, он имеется) и b — расстояние скважин до реки.

§ 158. Высота уровня воды у внешней стенки скважины y_r определяется по формуле Форхгеймера

$$y_r = \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K} \left(\frac{\pi b}{a} + \ln \frac{a}{\pi r} \right)} + \frac{q_0 b}{K}, \quad (151)$$

где Q — половина расстояния между скважинами. Остальные обозначения прежние.

§ 159. Высоту уровня воды по середине между скважинами можно определить по формуле Форхгеймера:

$$y_a = \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K} \left(\frac{\pi b}{a} - \ln 2 \right)} + \frac{q_0 b}{K}, \quad (152)$$

где y_a — высота уровня воды между скважинами и Q — расход скважин с радиусом r .

§ 160. Пользуясь двумя приведенными выше формулами, можно, задаваясь величиной $2a$, найти y , и y_a или, выбирая расстояние между высотой уровня воды у внешней стенки скважин и по середине между ними, определить расстояние между скважинами.

§ 161. Расстояние между скважинами определяется по формуле Форхгеймера:

$$a \ln \frac{a}{\pi r} = \left[H^2 - y_a^2 - \frac{2b}{K} (Q - q_0) \right] \frac{\pi K}{2}, \quad (153)$$

где a — половина расстояния между скважинами. Это уравнение решается графически или путем подбора.

§ 162. Определив расстояние между скважинами, следует уточнить дебит колодца по формуле Форхгеймера:

$$Q = \frac{H^2 - y_a^2 + \frac{2q_0 b}{K}}{\frac{\pi b}{a} + \ln \frac{a}{\pi r}} \pi K. \quad (154)$$

§ 163. По уточненному дебиту согласно формуле (154) и по окончательно принятому расстоянию между скважинами по формуле (153) снова определяют высоту уровня воды y_a между колодцами, которая должна соответствовать заданному в проекте снижению уровня грунтовых вод. Обычно задаются величиной y_r .

3. Расчет подобных в плане групп скважин по Кирилайсу

§ 164. Подобными группами взаимодействующих скважин называются такие, которые расположены в плане по контурам одной и той же геометрической фигуры, но имеющей в N раз большие или в N раз меньшие размеры.

Предложенный Кирилайсом метод практически применяется только для линейно расположенных скважин. При помощи этого метода можно определить дебит большего числа скважин на основании пересчета по приведенным ниже формулам дебита малого числа скважин, определенного путем опытной откачки.

§ 165. Для подобной в плане и в N раз большей группы скважин основная формула Форхгеймера может быть написана следующим образом:

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - y^2)}{\ln \frac{R}{\sqrt[n]{N x_1 \cdot N x_2 \dots N x_n}}} = \frac{\pi K(H - y^2)}{\ln R - \ln \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} - \ln N}. \quad (155)$$

§ 166. Если подобные в плане группы скважин будут иметь одну и ту же величину понижения, то дебит Q_2 — большей группы можно определить по следующей формуле:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\ln R - \ln \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} - \ln N}{\ln R - \ln \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n}}. \quad (156)$$

Обозначив через

$$A = \ln R - \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n},$$

получим

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{A - \ln N}{A},$$

где Q_1 дебит малой группы скважин, определенный на основании опытной откачки.

Для удобства расчетов при определении расстояний $x_1 x_2 \dots$, берется точка, расположенная по середине каждой линии скважины.

§ 167. Кирилайс считает, что число скважин n не имеет при расчете существенного значения; если же учесть число скважин, входящих в состав большой и малой групп их, то отношение их дебитов будет определяться уравнением:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\ln R - \frac{1}{n_2} \ln (x_1 x_2 \dots x_n)}{\ln R - \frac{1}{n_1} \ln (x_1 x_2 \dots x_n)}, \quad (157)$$

где n_2 — число скважин в большой и n_1 в малой группе скважин.

§ 168. Если в группах скважин будут разные понижения, то отношения их дебитов равно:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{(H^2 - y_1^2)(\ln R - \frac{1}{n_2} \ln x_1 \cdot x_2 \cdot x_n)}{(H^2 - y_2^2)(\ln R - \frac{1}{n_1} \ln x_1 \cdot x_2 \cdot x_n)}, \quad (158)$$

или приближенно:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{(H^2 - y_1^2)}{(H^2 - y_2^2)} \cdot \frac{A - \ln N}{A}, \quad (159)$$

где Q_2 везде означает дебит большой группы скважин.

4. Условия применения формул для расчета взаимодействующих грунтовых колодцев.

§ 169. Общие условия применения формул Форхгеймера для грунтовых колодцев те же, что и для артезианских скважин (гл. VII), т. е. они применимы для установившегося движения; для случая, когда движение подземной воды подчиняется закону Дарси; для определения уровня воды у внешней стеки скважин, а также при условиях, указанных в § 5, 6, 7 и 8 гл. VII.

§ 170. При расчетах водопонизительных установок для средне- и мелкозернистых грунтов допускается определение радиуса влияния по формулам Кусакина и Зихардта, но лучше эту величину определять по опытным методам, указанным в § 7.

§ 171. Метод Форхгеймера применим для скважин, имеющих, примерно, равные дебиты. Если пользоваться системой уравнений, число которых равно числу взаимодействующих скважин, то можно определить расстояние между скважинами при условии равенства дебитов или, наоборот, дебиты скважин — при условии равенства расстояний.

§ 172. Метод Кирилайса можно считать для инженерных расчетов приемлемым только в том случае, если количество скважин в большой группе незначительно превышает количество скважин, составляющих малую группу, из которых произведена опытная откачка. Например, при такой откачке из двух скважин суммарный дебит 15—20 скважин может быть подсчитан по методу Кирилайса только с большими погрешностями.

173. Для иллюстрации приведем пример расчета по методу Кирилайса. Допустим, что нам известен дебит десяти скважин, равный 100 л/сек, а сами скважины расположены на расстоянии 10 м одна от другой.

Далее примем для различного числа колодцев разную величину радиуса влияния, например, допустим, что для двух скважин $R = 400$ м, для четырех— 600 м, для шести— 800 м, для восьми— 1000 м, для десяти— 1200 м, для двадцати— 2500 м и для тридцати— 4000 м. Произведя подсчеты по формуле (157), получим данные, приведенные в табл. 19.

Таблица 19

Радиус влияния м	400	600	800	1000	1200	2500	4000
Число скважин	2	4	6	8	10	20	30
Суммарный дебит л/сек	93,8	97,0	98,5	99,4	100	98,3	96,5

Данные этой таблицы показывают, что, если принять во внимание изменение величины радиуса влияния всей группы скважин, это может привести даже как будто к нелепому результату, а именно, при увеличении числа скважин общий дебит уменьшается; например, дебит 20 и 30 скважин меньше дебита десяти и почти равен дебиту четырех и шести скважин. Это объясняется тем, что при увеличении радиуса влияния, естественно, нужно увеличивать и величину понижения, что влечет за собой соответственное увеличение дебита. Но отсюда все же следует, что достаточно точное определение величины радиуса влияния и зависимости его от дебита или от понижения имеет существенное значение для производства расчетов. Сравнительно небольшие изменения величины радиуса влияния (в приведенном выше примере на 200 м) влекут за собой совершенно случайные или даже неправильные результаты подсчетов. Таким образом формулы Кириллса следует считать недостаточно надежными.

5. Примеры расчета взаимодействующих грунтовых колодцев

§ 174. Допустим, что мы имеем следующие данные для расчета водопонизительной установки при расположении скважин по прямоугольному контуру размерами 30×60 м¹: минимально необходимое понижение в центре строительного контура $S=5,0$ м, радиус колодцев $r=0,2$ м, мощность грунтового потока $H=12,0$ м и коэффициент фильтрации $K=0,0002$ м/сек.

§ 175. Радиус действия водопонизительной установки определяем по формуле Кусакина:

$$R=575 S\sqrt{KH}=575 \cdot 5,0\sqrt{0,0002 \cdot 12} \approx 140 \text{ м.}$$

¹ Данный пример взят из работы Абрамова С. К., Григорьева В. М. и Розина К. И. Дренажные сооружения, Стройиздат Наркомстроя 1941.

§ 176. При небольшой мощности грунтового потока опускаем скважины до водоупора. Следовательно,

$$y_{\text{мин.}} = H - S = 12,0 - 5,0 = 7,0 \text{ м.}$$

§ 177. Вычисляем радиус равновеликого круга:

$$R_o = \frac{F}{\pi} = \sqrt{\frac{30 \cdot 60}{3,14}} \approx 24 \text{ м.}$$

§ 178. Далее определяем суммарный дебит водопонизительной установки с понижением в центре ее, равным 5,0 м.

$$\frac{3,14 \cdot 0,0002/2 \cdot 12 - 5,0/5,0}{\ln 140 - \ln 24} = 0,0336 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

§ 179. Определим теперь удельную водопропускную способность φ колодцев на 1 пог. м смоченной части фильтра.

$$\varphi = 2\pi r \sqrt{\frac{K}{15}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,2 \sqrt{\frac{0,0002}{15}} = 0,00117 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Следовательно, общая потребная длина смоченной части фильтров будет равна:

$$\frac{Q}{\varphi} = \frac{0,0336}{0,00117} = 28,7 \text{ м.}$$

§ 180. Число скважин определяем путем подбора, решая уравнения (145) и (146), задаваясь при этом числом скважин.

При $n = 5$:

$$y_o = \sqrt{49,0 - \frac{0,0336}{5 \cdot 3,14 \cdot 0,0002} \ln \frac{24}{50,2}} = 3,9 \text{ м},$$

$$n \cdot y_o = 5 \cdot 3,9 = 19,5 < \frac{Q}{\varphi} = 28,7 \text{ м};$$

при $n = 7$:

$$y_o = \sqrt{49,0 - \frac{0,0336}{7 \cdot 3,14 \cdot 0,0002} \ln \frac{24}{70,2}} = 5,24 \text{ м},$$

$$n \cdot y_o = 7 \cdot 5,24 = 36,6 > \frac{Q}{\varphi} = 28,7 \text{ м};$$

при $n = 6$:

$$y_o = \sqrt{49,0 - \frac{0,0336}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,0002} \ln \frac{24}{60,2}} = 4,73 \text{ м},$$

$$n \cdot y_o = 6 \cdot 4,73 = 28,3 \approx \frac{Q}{\varphi} = 28,7 \text{ м.}$$

Отсюда принимаем число скважин равным шести.

§ 181. Распределяем равномерно шесть скважин по прямоугольной форме контура, в пределах которого необходимо соз-

дать заданное понижение, и вычисляем уточненную цифру суммарного дебита. Из рис. 25 видно, что

$$x_1 = x_4 = 15,0 \text{ м}, \ln 15 = \\ = 2,71;$$

$$x_2 = x_3 = x_5 = x_6 = 33,5 \text{ м}, \\ \ln 33,5 = 3,51.$$

$$\frac{1}{n} \sum_{x_1}^{x_n} \ln x = \frac{19,46}{6} = 3,24.$$

Далее по следующей формуле определяем суммарный дебит:

Рис. 25

$$Q = \frac{\pi K(2H - S)S}{\ln R - \frac{1}{n} \ln x_1 x_2 \dots x_n} = \frac{3,14 \cdot 0,0002(2,12 - 5,0)5,0}{140 - 3,25} = 0,0355 \text{ м}^3/\text{сек}$$

В данном случае получим достаточно точное совпадение подсчетов суммарного дебита по формулам (135) и (144), и потому эту величину принимаем окончательно.

§ 182. Произведем проверку допустимой водопропускной способности одного колодца, для чего определим высоту уровня воды, например, у колодца № 3 по следующей формуле (рис. 26).

Из рис. 26 видно, что

$$\begin{array}{ll} x_1 = 42 \text{ м} & \ln x_1 = 3,72 \\ x_2 = 30 \text{ "} & \ln x_2 = 3,40 \\ x_4 = 30 \text{ "} & \ln x_4 = 3,40 \\ x_5 = 60 \text{ "} & \ln x_5 = 4,10 \\ x_6 = 65,5 \text{ "} & \ln x_6 = 4,18 \\ r = 0,2 \text{ "} & \ln r = 1,61 \end{array}$$

$$\Sigma \ln = 17,19$$

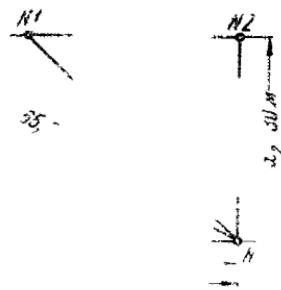


Рис. 26.

$$y_o = \sqrt{144 - \frac{0,0355}{3,14 \cdot 0,0002} (4,95 \cdot \frac{1}{6} \cdot 17,19)} = 5,06 \text{ м.}$$

Средний дебит одного колодца $Q_o = \frac{Q}{6} = \frac{0,0355}{6} = 0,0059 \text{ м}^3/\text{сек}$, допустимая же водопропускная способность одного колодца равна:

$$\varphi \cdot y_o = 0,00117 \cdot 5,06 = 0,0059 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Таким образом получается уже некоторый запас водопропускной способности одного колодца.

Аналогичным образом можно произвести проверку расчета и для других скважин. Этим заканчивается расчет.

§ 183. Приведем теперь пример расчета взаимодействующих скважин, расположенных вдоль берега реки на участке длиной 800 м, на расстоянии 28 м от уреза реки и при наличии грунтового потока со стороны водораздела. Допустим, что для расчета мы имеем следующие данные¹: напор над водоупором грунтового потока $H = 15,0$ м; уровень воды у запроектировано поддерживать на высоте 12 м над водоупором; единичный расход грунтового потока со стороны водораздела $q = 0,5$ м³/сутки; коэффициент фильтрации $K = 7,0$ м/сутки, и радиус колодцев = 0,2 м.

§ 184. Сначала определяем единичный дебит, приходящийся на единицу длины (погонный метр) ряда скважин:

$$Q = \frac{(15,0^2 - 12,0^2) 7,0 + 2 \cdot 0,5 \cdot 28,0}{2 \cdot 28,0} = 10,63 \text{ м}^3/\text{сутки}.$$

Зададимся теперь высотой уровня воды у колодца $y_r = 10,0$ м и путем подбора определим расстояние между колодцами, равное $2a$ по формуле (153):

$$a \ln \frac{a}{3,14 \cdot 0,2} = \left[15^2 - 10,0^2 - \frac{2 \cdot 28,0}{7,0} (10,63 - 0,5) \right] \frac{3,14 - 7,00}{2 \cdot 10,63}$$

$$a \ln \frac{a}{0,628} = 47,25.$$

Отсюда $a = 15$ м, а расстояние между скважинами — 30 м.

§ 185. Для найденного расстояния между скважинами в 30 м определим уточненную величину дебита, приходящуюся на длину 2 м, а в данном случае равную 30 м:

$$Q' = \frac{\frac{H^2 - y_r^2}{\pi b} + \frac{2q_0b}{K}}{\frac{\pi b}{a} + \ln \frac{a}{\pi r}} \pi K =$$

$$= \frac{15,0^2 - 10,0^2 + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 28,0}{7,0}}{\frac{3,14 \cdot 28,0}{15,0} + \ln \frac{15,0}{3,14 \cdot 0,2}} \cdot 3,14 \cdot 7,0 = 314 \text{ м}^3/\text{сутки}$$

или на 1 пог. м $314 : 30 = 10,46 \text{ м}^3/\text{сутки}$.

Полученная величина единичного дебита мало отличается от ранее вычисленной по приближенной формуле, и потому

¹ Пример взят из книги Абрамова С. К., Григорьева В. М. и Розина К. И. Дренажные сооружения, Стройиздат Наркомстроя, 1941.

далее уточнения величины расстояния между скважинами не производим.

§ 186. Наконец по следующей формуле определяем высоту уровня воды y_a между скважинами, которая согласно заданию должна равняться 12,0 м:

$$y_a = \sqrt{H^2 - \frac{Q_1}{\pi K} \frac{\pi b}{a} - \ln 2 - \frac{q_{ob}}{K}} = \\ = \sqrt{15,0^2 - \frac{314,0}{3,14 \cdot 70} \left(\frac{3,14 \cdot 28,0}{15,0} - 69 \right) + \frac{0,5 \cdot 28,0}{7,0}} = 12,02 \text{ м.}$$

Последний расчет показывает, что проектное задание выполняется.

Суммарный дебит всех скважин, очевидно, будет равняться:

$$Q = 10,46 \cdot 800 = 8268,0 \text{ м}^3/\text{сутки или } 97 \text{ л/сек.}$$

§ 187. Ниже приведем некоторые примеры расчета подобных водопонизительных установок, расположенных в один ряд по методу Кирилайса, заимствованные из его работы (10).

§ 188. Допустим, что мы имеем один ряд, состоящий из десяти скважин, расположенных на расстоянии 10 м одна от другой. Общий дебит этой группы скважин, определенный опытным путем, равен 100 л/сек. Второй ряд представляет собой удлинение первого в одну сторону на десять скважин с теми же 10-метровыми расстояниями между ними. Таким образом общая длина второго ряда скважин равна 190 м, а середина его смешена по отношению к первому ряду на 100 м. Третий ряд представляет собой удлинение второго в другую сторону также на десять колодцев и с тем же расстоянием между ними. Общая длина третьего ряда равна 290 м, а середина его совпадает с серединой первого ряда. Понижение в середине первого ряда равно 1,62 м, второго — 2,8 м и третьего — 3,79 м.

Далее примем $R = 1000 \text{ м}$, $H = 20 \text{ м}$. Тогда y_1 будет равен $20 - 1,62 = 18,38 \text{ м}$ и $y_2 = 20 - 2,8 = 17,2 \text{ м}$.

§ 189. Найдем теперь отношение дебитов первой группы скважин Q_1 с понижением 1,62 м и второй Q_2 с понижением 2,8 м. Для сравнения берем точку, находящуюся в середине каждого ряда; тогда для первого ряда будем иметь такие расстояния для скважин, расположенных по одну сторону от середины ряда:

$$x_1 = 5 \text{ м}, x_2 = 15, x_3 = 25, x_4 = 35 \text{ и } x_5 = 45 \text{ м.}$$

Применяя десятичные логарифмы для всего ряда, получим $\lg(5 \cdot 15 \cdot 25 \cdot 45)^2 = 12,940$.

Соответственно для второго ряда, состоящего из 20 скважин, будем иметь $\lg(5 \cdot 15 \cdot 25 \dots 95)^2 = 31,610$.

§ 190. Далее по формуле (158) подсчитаем суммарный дебит второго ряда:

$$Q_2 = 100 \frac{(400 - 295,8) \times (3,0 - \frac{1}{10} \cdot 12,940)}{(400 - 337,4) \times (3,0 - \frac{1}{20} \cdot 31,610)} = 200 \text{ л/сек.}$$

§ 191. Если произведем подсчет по приближенной формуле (159), то будем иметь:

$$A = \lg R - \frac{1}{n} (\lg x_1 x_2 \dots x_n) = 3,0 - \frac{12,940}{10} = 1,706,$$

$$\lg N = \lg \frac{190}{90} = 0,324. \text{ Следовательно,}$$

$$Q_2 = 100 \frac{(400 - 295,8)}{(400 - 337,4)} \cdot \frac{1,706}{1,706 - 0,324} = 205 \text{ л/сек.}$$

§ 192. Если принять, что в середине ряда, состоящего из 20 скважин, понижение будет попрежнему, как и для ряда из 10 колодцев, равно 1,62 м, то дебит по уравнению (156) будет равен:

$$Q_2 = 100 \frac{1,706}{1,706 - 0,324} = 123,5 \text{ л/сек.}$$

По более точной формуле (157) получим $Q_2 = 120,3 \text{ л/сек.}$

§ 193. Подсчитаем теперь дебит третьего ряда, состоящего из 30 колодцев при понижении 3,79 м. Тогда

$$y_3 = 20 - 3,79 = 16,21 \text{ м.}$$

$$\lg N = \lg \frac{290}{90} = 0,508 \text{ и } \lg(x_1 x_2 \dots x_n)^2 = \lg(5 \cdot 15 \dots 145)^2 = 52,547$$

Следовательно, по формуле (158)

$$Q_3 = 100 \frac{(400 - 262,5) \times (3,0 - \frac{1}{10} \cdot 12,940)}{(400 - 337,4) \times (3,0 - \frac{1}{30} \cdot 52,547)} = 300 \text{ л/сек.}$$

По приближенной формуле (159) будем иметь:

$$Q_3 = 100 \frac{(400 - 262,5) \cdot 1,706}{(400 - 337,4)(1,706 - 0,508)} = 313 \text{ л/сек.}$$

Из этих примеров следует, что погрешность подсчетов по методу Кирилайса увеличивается по мере увеличения длины ряда и соответственно числа скважин в нем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агаджанов А. М., Расчет дебитов взаимодействующих скважин в артезианском потоке. Разведка недр № 3, М., 1933.
2. Альтовский М. Е., Расчет дебита буровых колодцев по данным опытных откачек. Сборник трудов водопроводного сектора к Всесоюзному водопроводному съезду. Госстройиздат, М., 1934.
3. Альтовский М. Е., Основные принципы расчета взаимодействующих скважин в условиях подземного потока. Разведка недр № 15, М., 1937.
4. Альтовский М. Е., Примеры расчета взаимодействующих буровых скважин. Разведка недр № 16, М., 1937.
5. Альтовский М. Е., Расчет дебита по откачкам из одиночных скважин. Госгеолиздат, М.-Л., 1940.
6. Веригин Н. Н., Взаимодействие колодцев. Водоснабжение и сантехника, № 11—12, 1939.
7. Временная инструкция по расчету взаимодействующих артезианских скважин. Комитет по делам геологии при СНК СССР (составлена М. Е. Альтовским), Госгеолиздат, М.-Л., 1940.
8. Каменский Г. Н., Основы динамики подземных вод, ч. II, ОНТИ, М.-Л., 1935.
9. Кейльгак К., Подземные воды, русск. перевод ОНТИ, М.-Л., 1935.
10. Кирнлес B., Искусственное понижение уровня грунтовых вод, русск. перевод, Госстройиздат, М., 1933.
11. Краснопольский А. А., Грунтовые и артезианские колодцы, Горный журнал, тт. I, II и III, 1912.
12. Кусакин И. П., Искусственное понижение уровня грунтовых вод, 2-е издание, ОНТИ, М.-Л., 1935 и 1-е издание, ВТА, 1930.
13. Лейбенсон Л. С., Нефтепромысловая механика, ч. II, Нефтиздат, Москва—Грозный—Ленинград, Новосибирск, 1934.
14. Маккавеев А. А., Предварительные данные по исследованию источников питьевого водоснабжения для индустриального города Бобровского строительства (на правах рукописи). Бюллетень Гидротехниститута, № 7, 1932.
15. Мариупольский Г. М., Инструкция по проектированию и производству работ по искусственно понижению уровня грунтовых вод для строительных целей (проект), Стройиздат, М.—Л., 1940.
16. Принц Е., Гидрогеология, русск. перевод, Сельхозгиз, М.—Л., 1933.
17. Романов А. В., Береговой дренаж восточной части Замоскворечья. 1941.
18. Тамм Е. Ф., Расчет дебита артезианских скважин, Водоснабжение и санитарная техника, № 9, 1939.
19. Форхеймер Ф., Гидравлика, русск. перевод, ОНТИ, М.—Л., 1935.
20. Щелкачев В. Н. и Пыхачев Г. В., Интерференция скважин и теория пластовых водонапорных систем. Аз. ГОНТИ, Баку, 1939.
21. Dupuit J. Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et à travers les terrains permeables. edition 2, Paris, 1863.
22. Forchheimer F. Grundwasserspiegel bei Brunnenanlagen, Zeitsh. Ost. ing. u. Arch. Ver., Nr. 44, 1898.
23. Muskat M. The Flow of homogenous fluids through Porous Media, New York, 1937.
24. Schultz J. Grundwasserabsezung in Theorie und Praxis, Berlin, 1924.
25. Slichter Ch., Theoretical Investigation of the Motion of Ground Waters, Part II, XIX. Annual Report of the U. S. Geol. Survey, 1897—1898.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ НОРМАТИВНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОПЫТНЫХ ОТКАЧЕК

Правильность расчетов по всем приведенным в настоящем методическом руководстве формулам главным образом зависит от точности данных, получаемых в процессе проведения опытных откачек. Поэтому последние должны осуществляться с обязательным соблюдением некоторых требований или с выполнением определенных нормативных данных прежде всего в отношении расстояния между скважинами опытного узла и продолжительности опытных откачек. В настоящем приложении дается ряд методических указаний и нормативных данных, в известной мере обеспечивающих получение достаточно надежных материалов для производства расчетов.

Типы опытных узлов

В большинстве случаев на практике в первую очередь необходимо определение величины коэффициента фильтрации и зависимости дебита от понижения. Поэтому эти два фактора должны являться доминирующими при проектировании опытных узлов. Как известно, коэффициент фильтрации и зависимость дебита от понижения могут быть определены при производстве откачки из следующего простейшего опытного узла: одна опытная скважина и две наблюдательные, расположенные по одному лучу, идущему перпендикулярно направлению течения подземного потока.

Если учесть, что при малых понижениях в наблюдательных скважинах величина коэффициента фильтрации обычно получается ненадежной, то следует считать целесообразным почти во всех случаях сооружать так называемую "затрубную" скважину. Благодаря наблюдениям за понижением уровня воды в такой скважине можно дополнительно определить "разрыв" уровней и характер гидравлического режима подземного потока, если использовать зависимость между дебитом опытной скважины и понижением в затрубной. Все эти соображения дают основание считать главным типом опытного узла в однородных слоях узел, состоящий из одной опытной, одной затрубной и двух наблюдательных скважин, расположенных по лучу, идущему по простианию подземного потока. Сооружение двух, а тем более трех и четырех лучевых опытных узлов, как правило, должно допускаться только в исключительных случаях.

Целесообразность многолучевых опытных узлов может быть оправдана только неоднородностью состава слоев, слагающих водоносный слой или различной степенью трещиноватости скальных пород в тех случаях, когда по условиям проектирования необходимо определение коэффициента фильтрации по различным направлениям. Сюда прежде всего следует отнести сооружение опытных узлов на участках проектируемых плотин. В этом случае обычно сооружают двухлучевой опытный узел, причем один луч идет вдоль оси плотины, а другой перпендикулярно к ней. Кроме того, сооружение дополнительных лучей может быть вызвано необходимостью определения кривой депрессии между опытным узлом и лежащими вблизи открытыми водными потоками, водотоками и действующими водозаборами или дренажными сооружениями.

Число наблюдательных скважин, как правило, делается тем меньше, чем

глубже залегает изучаемый водоносный горизонт. Конечно, в этом отношении нет каких-либо обоснованных нормативных данных.

На практике две наблюдательные скважины и одна затрубная, расположенные по одному лучу, чаще всего делаются при глубине залегания кровли водоносных слоев до 30—40 м. При глубине залегания от 30—40 до 70—80 м обычно ограничиваются двумя наблюдательными скважинами, а при еще более глубоком залегании водоносных слоев от наблюдательных скважин отказываются по чисто экономическим соображениям. Исключение из этого правила обычно делается для проектирования осушительных мероприятий при разработке полезных ископаемых, а иногда при исследованиях для гидротехнического строительства.

Число наблюдательных скважин, расположенных по одному лучу, увеличивается сверх двух основных на одну-две скважины в том случае, если необходимо проследить за влиянием откачки на водоносные горизонты, лежащие ниже или выше.

Указанный основной тип опытного узла несколько усложняется, если в задачу откачки входит определение величины разрыва уровней, депрессионной кривой,仁дуса влияния взаимодействия скважин и, наконец, интерференции воронок депрессий.

Если определение разрыва уровней обязательно, что может иметь место при изысканиях для вертикальных дренажей и водопонизительных установок, то в состав опытного узла помимо наблюдательных скважин входит одна затрубная, располагаемая обязательно по лучу, идущему по простиранию подземного потока. Это условие является обязательным в силу того, что для грунтовых колодцев величина разрыва уровней различна по контуру обсадной трубы. Поэтому для получения сравнимых данных необходимо уже заранее уловиться, чтобы затрубные скважины располагались в определенном направлении по отношению к течению подземного потока. По лабораторным данным при расположении затрубной скважины по простиранию потока величина разрыва уровней будет получаться средней.

Изучение формы депрессионной кривой в настоящее время имеет только чисто теоретический интерес, поэтому обычно на практике изучение ее заменяется определением величины понижения или срезки уровня воды на том или ином расстоянии от опытной скважины. Частично этот вопрос решается откачкой из основного типа опытного узла и результатами наблюдений за понижением уровня воды в наблюдательных скважинах. Однако в ряде случаев (изыскания для дренажей, водопонизительных установок и осушительных мероприятий по горным выработкам) этих данных бывает недостаточно, так как наблюдательные скважины, сооружаемые для определения коэффициента фильтрации, располагаются не в тех местах, где по проекту требуется создать определенную величину понижения. Местоположение этих точек всецело определяется гидрогеологическими условиями данного участка и проектными соображениями. Поэтому число и местоположение скважин, сооружаемых для наблюдения за величиной понижения в точках, удаленных на то или иное расстояние от опытных, определяется в каждом отдельном случае гидрогеологом совместно с проектировщиком.

Для определения практической величины радиуса влияния опытным путем необходимо пробурить две-три наблюдательные скважины, удаленные на достаточно большое расстояние от опытной, примерно, равное предполагаемой величине радиуса влияния. Эти примерные расстояния указаны в табл. 1. На практике наблюдательные скважины для определения радиуса влияния опытным путем сооружаются в очень редких случаях. В силу экономических соображений вычислять величину радиуса предпочитается или по формулам или графическим путем по данным наблюдательных скважин основного опытного узла.

Для решения задачи о взаимодействии скважин основной опытный узел дополняется второй опытной скважиной, отстоящей от первой, в зависимости от гидрогеологических условий, на различных расстояниях. Таким образом в этом случае опытный узел будет состоять из двух опытных, двух наблюдательных и одной затрубной скважин, причем наблюдательные скважины сооружаются около одной из опытных и на тех расстояниях от нее, которые необ-

ходимы для определения коэффициента фильтрации. Для глубоко залегающих водноносных слоев число наблюдательных скважин и для этого типа опытного узла может быть сокращено на основании ранее данных по этому поводу указаний.

Для изучения интерференции воронок депрессий, что на практике может потребоваться в редких случаях, двойной опытный узел (две опытные скважины), сооружаемый для изучения явления взаимодействия, дополняется некоторыми наблюдательными скважинами; при этом одна из них располагается по середине между двумя опытными скважинами по две вверх и вниз по потоку от каждой из них. В этом случае наблюдательные скважины, сооружаемые для определения коэффициента фильтрации, располагаются около одной из опытных в обратную сторону от второй опытной скважины.

Таким образом в состав этого сложного двойного опытного узла входят девять скважин: две опытные, одна затрубная, две наблюдательные для определения коэффициента фильтрации и четыре наблюдательные для изучения интерференции воронок депрессий.

Расстояние между скважинами опытного узла определяется прежде всего целевым назначением откачки, а затем основными гидрогеологическими условиями данного участка, из которых важнейшими являются: водопроницаемость (величина коэффициента фильтрации), тип движения подземного потока (напорный или грунтовый) и величины понижения в опытной скважине. Водоносные слои по степени водопроницаемости условно можно разделить на четыре группы: а) породы с большой водопроницаемостью—коэффициент фильтрации более 60-70 м/сутки, б) со средней водопроницаемостью—от 20 до 60-70 м/сутки, в) породы с малой водопроницаемостью—от 5 до 20 м/сутки и, наконец, г) породы с очень малой водопроницаемостью—менее 5 м/сутки.

Из практики производства откачек и последующих расчетов известно, что наименее надежная величина коэффициента фильтрации получается в том случае, если понижения в наблюдательных скважинах были достигнуты порядка 0,1—0,2 м и менее. Ненадежные данные получаются также в том случае, если разность между понижениями, полученными в соседних наблюдательных скважинах, была порядка 0,05—0,1 м.

Отсюда следует, что наблюдательные скважины, сооружаемые в целях определения величины коэффициента фильтрации, нужно располагать возможно ближе к опытной скважине. Кроме того, разность между понижениями в опытной скважине должна быть такой, чтобы разность понижений в наблюдательных скважинах была не менее 0,3—0,5 м. Располагая наблюдательные скважины близко к опытной, в большинстве случаев не следует опасаться погрешностей, возникающих в результате перехода ламинарного движения в турбулентное, так как последнее, по исследованию В. Н. Щелкачева, распространяется очень недалеко от опытной скважины.

При определении расстояния между опытными скважинами, сооружаемыми для изучения взаимодействия, необходимо принимать во внимание следующее основное условие: степень влияния между скважинами, выражаемая отношением понижений уровня воды в опытной скважине, к понижению в соседней, должна равняться 0,1—0,25. Эти два предела взяты, исходя из следующих соображений: если степень влияния будет меньше 0,1, то погрешности наблюдений становятся настолько большими, что существенно искажают результаты опытных работ; наоборот, если степень влияния будет больше 0,25, то в дальнейшем опытные скважины будут затруднительно использовать как эксплоатационные.

Так как влияние скважин друг на друга в условиях скальных, сильно трещиноватых, пород весьма велико, то расстояние между опытными скважинами для напорных вод следует принимать порядка 250—400 м, а для грунтовых вод — 200—300 м. Для напорных водоносных горизонтов, сложенных гравийно-галечниковыми отложениями с коэффициентом фильтрации более 60-70 м/сутки, расстояние между опытными скважинами нужно принимать порядка 100-200 м, а для грунтовых вод — 75-150 м.

С учетом приведенных выше положений нами просмотрено и обработано около 150 откачек, проведенных в самых разнообразных гидрогеологических условиях. Результаты этой проработки приведены в табл. 1, в которой даны

рекомендуемые расстояния между опытными и наблюдательными скважинами. Данные этой таблицы, конечно, следует рассматривать как ориентировочные, предохраняющие от грубых ошибок при постановке откачек в малоизученных в гидрогеологическом отношении районах; если же в том или ином районе имеется уже соответствующий опытный материал, дающий основание принять иные расстояния между скважинами, то нужно, конечно, отдать предпочтение им, хотя бы они и несколько расходились с данными, приведенными в табл. 1. Кроме того, следует отметить, что при откачке с понижением в опытных скважинах, превышающим 8-10 м, указанные в таблице расстояния для наблюдательных скважин можно увеличивать в 1,5-1,7 раза.

т а б л и ц а 1

Литологический состав водоносных пород	Коэффициент фильтрационный м/сутки	Подземный поток	Расстояние наблюдательных скважин от опытных м			Расстояния между опытными скважинами	Примерная величина радиуса влияния м
			1-й	2-й	3-й		
1	2	3	4	5	6	7	8
Скальные, сильно трещиноватые породы	Более 60-70	Напорный	15-20	30-40	60-80	250-400	500 и более
		Грунтовый	10-15	20-30	40-60	200-300	
Гравийно-галечниковые породы, чистые, без примеси мелких частиц; крупные и среднезернистые, однородные пески	Более 60-70	Напорный	8-10	15-20	30-40	100-200	200-300
		Грунтовый	4-6	10-15	20-25	75-150	
Скальные, слабо трещиноватые породы	От 20 до 60	Напорный	6-8	10-15	20-30	100-200	150-250
		Грунтовый	5-7	8-12	15-20	75-150	
Гравийно-галечниковые породы со значительной примесью мелких частиц	От 20 до 60	Напорный	5-7	8-12	15-20	50-100	100-200
		Грунтовый	3-5	6-8	10-15	40-75	
Неоднородные крупные и среднезернистые, разнозернистые и мелкозернистые пески	От 5 до 20	Напорный	3-5	6-8	10-15	40-75	80-150
		Грунтовый	2-3	4-6	8-12	30-60	

Приложение. Затрубная скважина закладывается на расстоянии 20-30 см от внешней стени опытной скважины.

В последней графе табл. 1 даны примерные величины радиусов влияния. Эти данные можно использовать в тех случаях, когда желательно определить величину радиуса влияния опытным путем, причем расстояния между наблюдательными скважинами должны быть от 30 до 50 м, а расстояния их от опытных — в пределах, указанных в последней графе табл. 1. Следует отметить, что величина радиуса влияния дана весьма условно на основании отдельных отрывочных данных откачек.

Средняя продолжительность откачки

Вопрос о продолжительности опытной откачки очень сложен, и вряд ли в настоящее время можно дать в этом отношении какие-либо строго определенные данные. Поэтому в табл. 2 приводятся примерные пределы продолжительности откачек, которые, в зависимости от имеющихся по тому или иному району опытных данных, следует соответствующим образом корректировать.

При производстве откачек воды из скважин необходимо учитывать следующее: а) прежде всего скважина освобождается от мутной воды, — это так называемый процесс осветления скважины; б) затем, в случае крупнобломочных или гравийноватых пород в течение некоторого срока из нее выываются иелкие частицы и в песчаных слоях образуется так называемый естественный фильтр, в это время водообильность скважины постепенно увеличивается, в связи с чем повышается и ее удельный дебит; в) в скважине устанавливается в течение какого-то периода стабильное состояние динамических уровней воды и дебита. Так как при каждой откачке неизбежно получаются различного рода неполадки и перерывы, то это в конечном счете увеличивает ее общую продолжительность.

Все указанные выше обстоятельства, имеющие место при производстве откачек, происходят, большей частью, не последовательно одно за другим, а одновременно. В настоящее время мы не имеем теоретических предпосылок или формул, которые позволили бы вычислить время, необходимое для осветления скважин, прокачки их, установления динамических уровней, и таким образом заранее определить продолжительность откачки. Поэтому было необходимо обратиться к опытному материалу. Нами просмотрен материал примерно 150 откачек, проведенных в самых разнообразных гидрогеологических условиях. При этом вопрос о достаточной продолжительности проведенной откачки решался на основании следующего положения: продолжительность откачки считалась достаточной, если при увеличении величины понижения удельный дебит не увеличивался. Водоносные породы были разделены по величине коэффициента фильтрации и удельного дебита на четыре группы, и кроме того отдельно выделялись напорные и грунтовые воды. В результате такой проработки материалов откачек получились статистические данные, правда относительно небольшие, на основе которых и составлена табл. 2 средней продолжительности откачки на одно понижение.

При составлении этой таблицы мы пользовались следующей номенклатурой откачек.

1. Прокачка скважины. В результате проведения ее без сколько-нибудь точного определения величин дебита и понижения устанавливается только, существует или нет приток воды в скважину из вскрываемых ею слоев. Прокачка обычно ведется простейшими способами (например, желонкой, ручными насосами), и время, необходимое для ее проведения, предусматривается коэффициентом 1,18, даваемым СУСН на гидрогеологические наблюдения (СУСН, выпуск 1, буровые и горнопроходческие работы).

2. Пробная откачка. Цель ее — ориентировочное определение удельного дебита скважин для сравнительной характеристики водообильности отдельных точек водоносных горизонтов, для проектирования опытных и длительных откачек и в неответственных случаях для проектирования эксплоатационных насосных установок. Эти откачки обычно производятся с одним или максимум с двумя понижениями ручным или механическим способом.

3. Пробно-эксплоатационная откачка. Производится она для установления опытных путем возможности получения из скважины того или иного, но заранее обусловленного договором или проектом, количества

яды. Эти откачки ведутся с одним понижением, обеспечивающим обусловленный проектом или договором дебит и обязательно механическим способом.

4. Опытная откачка. Цель ее — получение характеристики водообильности скважины, выражаемой графиком или формулой зависимости дебита от понижения. Опытные откачки проводятся минимум тремя понижениями.

Таблица 2

Средняя продолжительность опытных откачек

Характеристика водоносных горизонтов				Средняя продолжительность откачек на каждое понижение в 8-часовых сменах			
Литологический состав	Коэффициент фильтрации м/сутки	Удельный дебит л/сутки	Водоносный горизонт	Опытные			
1	2	3	4	5	6	7	8
Скальные сильно трещиноватые и более гравийно-галечниковые породы без значительной примеси мелких частиц	Более 60—70	5—10 и более	Напорный	1—2	6—9	9—15	6—12
Скальные трещиноватые породы, мел, гравийно-галечниковые породы со значительной примесью мелких частиц, гравелестные разнозернистые пески	От 20 до 60	от 1,0 до 5—10	Грунтовый Напорный	2—3 2—4	9—12 9—15	12—18 12—18	9—15
Скальные, слаботрещиноватые породы (доломиты, мел, мергели, сланцы) и разнозернистые пески	От 5 до 20	0,1—0,5 до 1,0	Грунтовый Напорный	3—5 3—5	2—18 12—18	15—21 15—21	12—18
Мелкозернистые неоднородные пески	До 5 и менее	0,01 до 0,5	Напорный Грунтовый	4—6 4—6	12—18 12—18	15—24 15—24	12—18

Примечание. Продолжительность пробно-эксплоатационных откачек принимается примерно равной средней максимальной продолжительности опытных откачек из одиночных скважин (графа 6).

5. Длительная откачка. Проводится она с целью определения опытным путем дебита скважины, когда гидрогеологические условия указывают на возможность отиосительного быстрого истощения запасов подземных вод в водоносном слое, предназначенном для эксплоатации. Этого рода откачки обязательно ведутся механическим способом; число понижений, а главное их продолжительность заранее не нормируются. Обычно продолжительность длительных откачек колеблется от нескольких недель до нескольких месяцев.

В табл. 2 приведены нормативные данные для средней продолжительности пробных, строительных и опытных откачек причем продолжительность строительных откачек определяется отдельным примечанием к той же таблице.

Из проработки имеющихся материалов по откачкам выясняется, что процесс прокачки скважины, обуславливающий образование естественного фильтра или вынос мелких частиц из трещин скальных пород, распространяется не только на грунт, непосредственно прилегающий к стенке скважины но и на некоторую часть водоносного слоя. Кроме того, требование достижения стабильных динамических уровней относится не только к скважине, из которой производится откачка, но и к окружающим ее наблюдательным. Поэтому продолжительность откачек из опытных узлов, очевидно, должна быть иная, и притом большая, по сравнению с откачками из одинаковых скважин. Проработанный материал позволяет рекомендовать для продолжительности откачек из опытных узлов приведенные в графе 7, табл. 2, данные, обеспечивающие отиосительную стабильность динамических уровней в наблюдательных скважинах. На основании проработанных материалов выяснилось, что при соблюдении рекомендуемой продолжительности откачек повышение удельного дебита при увеличении понижения в наблюдательных скважинах не имеет места.

Групповые откачки (т.е. производимые одновременно из нескольких скважин) безусловно должны быть менее продолжительными, чем производимые из опытных узлов. Перед групповой откачкой обычно производятся откачки из каждой скважины в отдельности, благодаря чему время, затрачиваемое на прокачку скважины, падает на откачки из одиночных скважин, что учтено в данных, приведенных в графах 6 и 8 табл. 2.

Продолжительность пробных откачек дана в табл. 2 только для одиночных скважин, так как проводить пробные откачки, учитывая их целевое назначение, из опытных узлов или из группы скважин не имеет смысла.

В табл. 2 указана также средняя продолжительность откачек. В зависимости от некоторых условий для разных понижений рекомендуется давать различную продолжительность откачек. Так, при откачке воды из рыхлых обломочных пород, проводимой с тремя понижениями, продолжительность откачек на каждое понижение примерно должна относиться одна к другой как 1:1, 5:2 или как 1:2:3, если продолжительность первого и меньшего по величине понижения принять за единицу. При этом последнего соотношения рекомендуется придерживаться при мелкозернистых песках и других обломочных породах со значительной примесью мелких частиц. При откачке из скальных трещиноватых пород соотношения продолжительности откачек на каждое понижение можно принять следующие: 1:2:2, 1:1:3 и 1:1:4, если продолжительность меньшего по величине понижения принять за единицу. При этом следует иметь в виду, что максимальная продолжительность откачки не должна превышать средней продолжительности откачек, указанных табл. 2.

Число, величина и порядок понижений

Пробные откачки производятся с одним, максимум с двумя понижениями. Все опытные откачки как из одиночных скважин, так и из опытных узлов, для получения зависимости дебита от понижения, производятся минимально с тремя понижениями.

При производстве опытных откачек, проводимых только для определения коэффициента фильтрации, допускаются откачки с двумя понижениями. В производстве пробных откачек величина понижений не регламентируется, поскольку заранее ее нельзя определить сколько-нибудь точно.

При производстве опытных откачек из одиночных скважин и опытных узлов в отношении величины понижений рекомендуется придерживаться следующих положений:

а) Минимальное понижение не должно быть менее 1 м, так как иначе получаются очень незначительные понижения в наблюдательных скважинах и завышенная величина для расчета удельного дебита.

б) Максимальное понижение не должно быть менее 2—2,5 м, так как в противном случае будет получаться очень незначительная разность между величиной отдельных понижений.

в) Если опытная откачка производится с целью определения зависимости дебита от понижения и если в дальнейшем предполагается вести расчет для очень больших понижений, то, учитывая возможность экстраполяции по существующим формулам, максимальное понижение должно равняться, примерно, 0,3—0,5 величины столба воды в скважине.

г) В условиях, когда проектный дебит может быть получен при относительно небольших понижениях, максимальное понижение опытной откачки должно равняться 30—60% проектируемой величины понижения.

д) Величина отдельных понижений подбирается таким образом, чтобы разность между соседними понижениями была, примерно, одинаковой.

е) Величина понижений при групповых откачках должна более или менее точно равняться величине понижений, полученных при одиночных откачках.

Если откачка производится с целью определения коэффициента фильтрации, то здесь можно руководствоваться следующими данными, соблюдение которых, примерно, обеспечивает разность между понижениями в наблюдательных скважинах порядка 0,3—0,5 м.

а) При откачке из скальных, трещиноватых водонасыщенных пород с коэффициентом фильтрации выше 20 м/сутки разность между соседними понижениями в опытной скважине должна, примерно, равняться 1—1,5 и не менее 1,0 м; для меловых пород — 2—3 и не менее 1,0 м и для рыхлых гравелисто-галечниковых и песчано-гравелистых пород 1,5—2,5 и не менее 1,0 м.

б) Для средне- и мелкозернистых пород с коэффициентом фильтрации от 5 до 20 м/сутки разность между соседними понижениями в опытной скважине следует принимать порядка 2,0—3,0 и не менее 1,5 м, а для песчано-глинистых от 2,5 до 3,5 и не менее 2,0 м.

При откачке из скважин и шурfov, имеющих столб воды порядка 4 м, рекомендуется производить откачуку с двумя понижениями — первое около 1,0 и второе 2,0—3,0 м.

Строительные откачки проводятся с одним понижением, причем величина последнего должна быть такой, чтобы из скважины откачивалось обусловленное проектом или договором количество воды.

Опытную откачуку из рыхлых водонасыщенных пород рекомендуется начинать с меньшего понижения и постепенно переходить к большим, так как, начав сразу с большого понижения, можно закупорить сетку фильтра; кроме того такой порядок лучше обеспечивает за скважиной постепенное образование естественного фильтра.

Наоборот, опытные откачки из скальных, трещиноватых пород и вообще во всех случаях, когда их можно производить без фильтра, следует начинать с максимального по величине понижения и постепенно переходить к меньшим. Благодаря этому при максимальном понижении сразу будет вынесена большая часть мелких частиц, заполняющих трещины скальных пород, и зависимость дебита от понижения будет получена без существенных искажений.

Если тот или иной принятый порядок производства понижений все же не дает правильного характера зависимости дебита от понижения (удельный дебит не должен увеличиваться), то откачуку рекомендуется повторить полностью, создавая в скважине те же, что и в первый раз, по величине понижения с продолжительностью откачки не более 4—6 часов на каждое понижение. Отсюда следует, что демонтировать насосную установку из опытной скважине нужно только после того, как по предварительной проработке материалов будет установлено, что в результате откачки получены достаточно надежные данные.

ОПЕЧАТКИ

Стра- ница	Строка	Напечатано	Следует читать	По чьей вине
21	14 снизу	наблюдению	падению	корректора
29	2 формула сверху	$\frac{dy}{ds}$	$\frac{dy}{ds}$	тиографии
32	3 формула снизу	$\sqrt{100.01} = 3.16 \text{ м}$	$\sqrt{100.01} = 3.16 \text{ м}$	корректор
32	2 формула снизу	$\pm \frac{1}{2}$	$\pm \frac{1}{2}$	"
34	10 снизу	r_1'	r_2'	"
35	2 формула сверху	$\left. \frac{r_1 r_1}{r_2 r} \right)$	$\frac{r_1 r_1'}{r_2 r}$	"
35	3 формула сверху	$\ln \frac{R^2 - a}{R_1}$	$\ln \frac{R^2 - a}{R^0}$	"

Альтовский М. Е.