охрана окружающей природной среды

Н. А. Плотников
В. С. Алексеев

Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод

Стройиздат

охрана окружающей природной среды

Н. А. Плотников
В. С. Алексеев

Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод

Москва Стройиздат 1990

ББК 38.774
П 39
УДК 628.112

Печатается по решению секции литературы по теоретическим основам строительства редакционного совета Стройиздата

Рецензент — канд. техн. наук А. Ф. Порядин (Министерство жилищно-коммунального хозяйства РСФСР)

Редактор — М. В. Степанова

Плотников Н. А., Алексеев В. С.

П 39 Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. — М.: Стройиздат, 1990. — 256 с.: ил. — (Охрана окружающей природной среды).
ISBN 5-274-01115-2

Рассмотрены вопросы проектирования водозаборов подземных вод и даны различные системы водозаборов и способы обеспечения необходимого качества воды. Впервые приведены требования к гидрогеологическим обоснованиям, проектированию и эксплуатации водозаборов в особых условиях. Рассмотрены вопросы автоматического управления водозаборами и дан экономический анализ.

Для инженерно-технических работников проектных организаций и служб эксплуатации.

П $\frac{3308010000-456}{047(01)-90}$ 44—90 **ББК 38.774**

Производственное издание

ПЛОТНИКОВ НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ
АЛЕКСЕЕВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Мл. редактор *Н. А. Юдакова*
Художественный редактор *Л. Ф. Егоренко*
Технические редакторы *М. В. Павлова, М. Г. Ангерт*
Корректоры *Г. А. Кравченко, Е. Б. Тотмина, Т. Г. Бросалина*
ИБ № 4314

Сдано в набор 09.10.89. Подписано в печать 19.03.90. Т-05298. Формат 60×90 1/16.
Бумага тип. № 2. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 16,0.
Усл. кр.-отт. 16,25. Уч.-изд. л. 17,21. Тираж 12300 экз. Изд. № AVI-1749.
Заказ 3328. Цена 1 р. 10 коп.

Стройиздат 101442. Москва, Каляевская, 23а

Великолукская городская типография управления издательств, полиграфии и книжной торговли Псковского облисполкома
182100. г. Великие Луки, ул. Полиграфистов, 78/12.

ISBN 5-274-01115-2 **© Плотников Н. А., Алексеев В. С., 1990**

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года отмечена необходимость усиления поисков и разведки подземных вод для использования их в народном хозяйстве.

Подземные воды являются источником сельскохозяйственного водоснабжения, а при наличии хорошей защиты от загрязнений их используют в целях хозяйственно-питьевого водоснабжения крупных населенных пунктов и городов. Схемы комплексного использования поверхностных и подземных вод реализованы в таких крупных городах, как Киев, Тбилиси, Рига и др.

Негативные тенденции изменения качества воды в поверхностных водоисточниках (реках, водохранилищах, озерах) приводят к необходимости существенного совершенствования очистных сооружений, и хотя разработаны технологические решения для кондиционирования поверхностных вод даже при высокой степени их загрязнения, состояние освоения серийного выпуска специального водоочистного оборудования, реагентов, средств контроля и автоматизации процессов водоподготовки до настоящего времени неудовлетворительное. Существенным сдерживающим фактором в развитии современных технологических процессов при очистке воды становится и необходимость принципиального изменения подхода к объемам капитальных вложений на строительство водоочистных сооружений, которые должны возрастать гораздо более высокими темпами.

В этих условиях единственной альтернативой развития хозяйственно-питьевого водоснабжения остается расширение масштабов использования подземных вод, хотя это ни в коей мере не должно быть причиной замедления разработки и освоения на производстве надежных очистных сооружений при использовании в качестве источника водоснабжения в той или иной степени загрязненных вод.

В настоящей работе наряду с описанием основных принципов проектирования сооружений для забора подземных вод охарактеризованы прогрессивные методы их строительства и обустройства. Водозаборные сооружения рассматриваются в комплексе с системами искусственного восполнения подземных вод (ИВПВ), использование которых позволяет эксплуатировать водозаборы в оптимальном гидродинамическом режиме и осуществлять регулирование качества отбираемой из водоносных пластов и подаваемой потребителю воды. Важным аспектом эксплуатации водозаборов остается поддержание их стабильного действия в течение всего периода амортизации. Технические средства и технология производства этих работ, описанные в данной книге, обеспечивают успешное решение указанных задач. Вплотную к этим проблемам примыкают и вопросы реконструкции водозаборных сооружений, рассмотренные как способы интенсификации действующих водозаборов.

Впервые в отечественной литературе подробно описано обоснование технологии обезжелезивания подземных вод в пласте с характеристикой установок периодического и непрерывного действия.

В. С. Алексеевым написаны предисловие и главы 4—10, 12—14, 17—19, Н. А. Плотниковым — главы 1—3, 11, 15, 16, 20, Г. М. Коммуиаром — глава 21.

Авторы выражают глубокую признательность канд. техн. наук А. Ф. Порядину, взявшему на себя труд по рецензированию рукописи и сделавшему по ней ряд ценных замечаний.

ГЛАВА 1. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ, ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

1.1. Условия залегания подземных вод

Изучением подземных вод занимается наука гидрогеология. Отметим кратко важнейшие гидрогеологические показатели и условия залегания подземных вод, определяющие использование их водозаборами для водоснабжения, обводнения, орошения и других потребностей.

Подземные воды по гидравлическим условиям делят на напорные и безнапорные, а по условиям залегания — артезианские и грунтовые (рис. 1.1). Такое разделение до некоторой степени условно. Например, подпитка артезианских вод безнапорная, т. е. подземные воды не поднимаются выше водовмещающих пород. При выходе напорных вод на поверхность образуется восходящий источник (см. рис. 1.1), а при выходе безнапорных — нисходящий.

В речных долинах обычно откладываются рыхлые, так называемые аллювиальные, водопроницаемые породы (песок, гравий, галька), на уровне которых находятся грунтовые воды (не только безнапорные, но и напорные), а также глинистые породы. В ледниковых отложениях чаще встречаются напорные и слабонапорные воды (также в песках, гравии и галечниках). Необходимо отметить, что широко распространенные подземные воды по степени минерализации разделяют на пресные (до 1 г/л), солоноватые (до 25 г/л), соленые (до 50 г/л), рассолы (более 50 г/л).

Залегают подземные воды в различных гидрогеологических слоях близ поверхности земли или чаще на глубине, превышающей десятки и сотни метров. В отдельных случаях используют пресные воды, залегающие на глубинах до 1 км и более; минеральные, термальные и промышленные (для извлечения йода, брома и других химических элементов) чаще залегают на бо́льших глубинах. Условия залегания и распространения подземных вод в СССР изучены довольно подробно, но для конкретного их использования нужны детальные исследования. При оценке эксплуатационных запасов подземных вод по данным изысканий выделяют участки водоносной системы, на которых под влиянием естественных и искусственных факторов, включая эксплуатацию подземных вод, создаются благоприятные условия по сравнению с окружающими площадями для отбора подземных вод соответствующими водозаборами в количестве, необходимом для целевого использования в народном хозяйстве. Такие участки классифицируются как месторождения подземных вод, которые характеризуются, в частности, следующими условиями залегания подземных вод (по Л. С. Язвину и др.): 1) в пределах современных и погребенных речных долин; 2) в артезианских бассейнах;

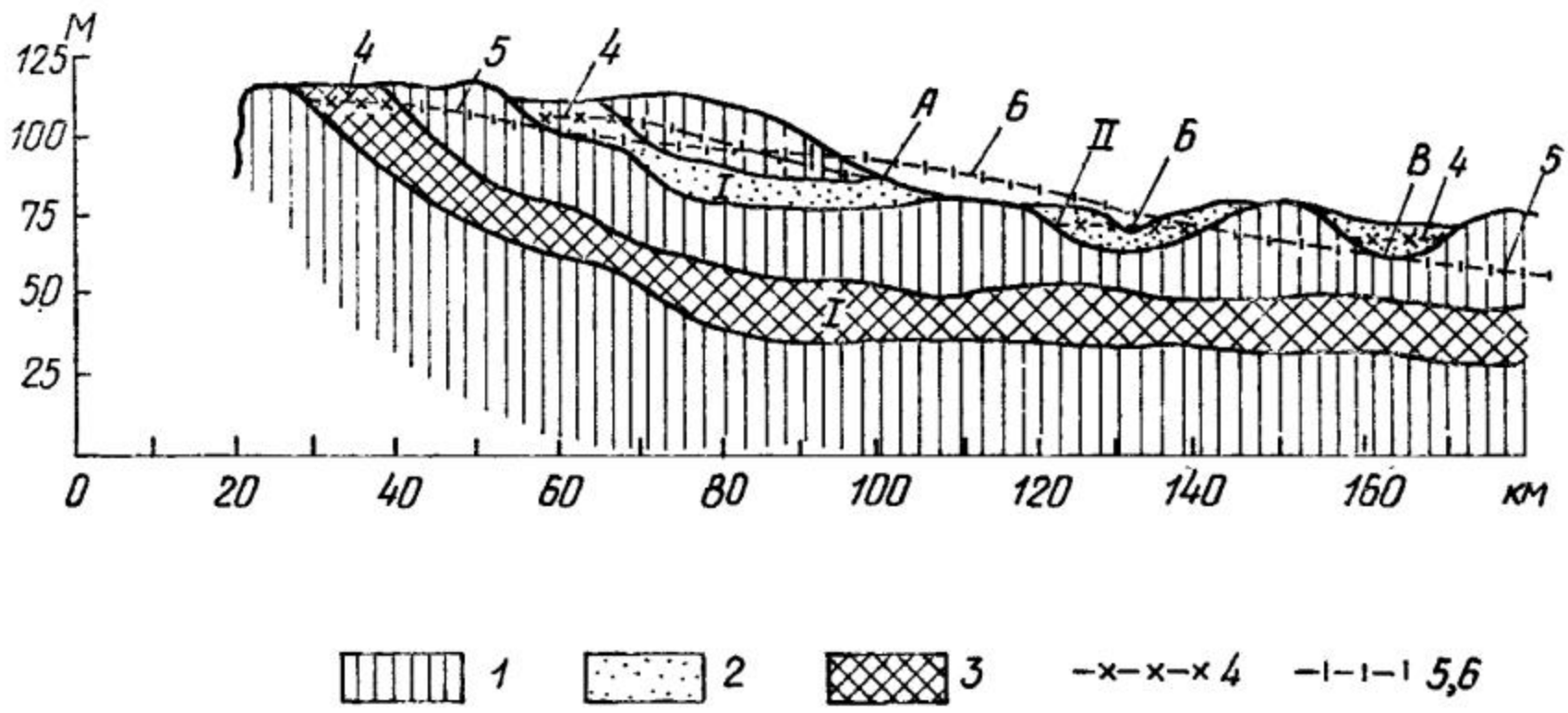


Рис. 1.1. Схема залегания подземных вод

1 — глины; *2* — пески; *3* — трещиноватые и кавернозные известняки; *4* — уровень безнапорных вод; *5* — уровень напорных вод; *6* — то же, выше уровня земли; А — восходящий источник; Б — река; В — бассейн грунтовых вод; I — артезианский водоносный горизонт; II — грунтовые воды в аллювиальных отложениях

3) в конусах выноса, предгорных шлейфах и межгорных впадинах; 4) в ограниченных по площади структурах или массивах трещинных и трещинно-карстовых пород, а также в зонах тектонических нарушений; 5) в песчаных массивах пустынь и полупустынь; 6) в надморенных и межморенных водно-ледниковых отложениях; 7) в таликовых зонах области развития многолетнемерзлых пород, а также в других условиях (например, в ряде водоносных горизонтов, приуроченных к трещиноватым и закарстованным известнякам каменноугольной системы Подмосковного артезианского бассейна).

1.2. Использование подземных вод

Общее мировое использование подземных вод в XX в. для хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных пунктов, промышленных предприятий, а также в сельском хозяйстве резко возросло [6]: в начале века годовой расход составлял около 400 км^3, к 1970 г. он увеличился до 2600 км^3, т. е. стал в 6,5 раза больше, а к 2000 г. намечается увеличение до 5800 км^3. При этом наибольший расход подземных вод приходится на орошение.

Мировая промышленность за это время увеличила годовое потребление с 30 до 650 км^3, т. е. почти в 22 раза. По данным И. С. Зекцера, Н. И. Плотникова и Л. С. Язвина, наиболее крупным потребителем подземных вод в СССР является в настоящее время коммунальное хозяйство. Общий отбор подземных вод в СССР для коммунального хозяйства (и, вероятно, частью для промышленности) в последнее время составляет 320—350 м^3/с. Для сельскохозяйственного водоснабжения и обводнения пастбищ в СССР расходуется около 180—200 м^3/с и для орошения — около 250 м^3/с.

Всего в СССР подземных вод используется около 800 м³/с, или 25 км³/год, что составляет по указанным данным небольшую часть их прогнозируемых ресурсов. В отдаленной перспективе для городского и сельскохозяйственного водоснабжения с обводнением пастбищ намечается использовать около 2 тыс. м³/с, или около 60 км³/год подземных вод, что составляет лишь $^1/_5$ часть общих прогнозируемых ресурсов. Но в некоторых районах, например в Молдавии, потребность вдвое превышает прогнозируемые ресурсы. Следует также учитывать, что эти ресурсы (имеются в виду пресные воды) расположены неравномерно на территории СССР и нередко далеко от потребителя. Поэтому исходя из технико-экономических показателей не всегда целесообразно их использовать для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

По последним данным [25] прогнозы дальнейшего увеличения потребления подземных вод изменились в пользу их экономии. Так, в США в 1970 г. водозабор пресных вод на хозяйственные нужды составлял 450 км³/год. К 2000 г. предполагается использовать 370—500 км³/год, т. е. примерно на уровне 1970 г.

1.3. Законодательство по подземным водам и технические нормативы

Важнейшим законом водопользования являются «Основы водного законодательства Союза ССР и союзных республик», утвержденные 10 декабря 1970 г. Верховным Советом СССР, где установлены основные требования к вопросам использования водных ресурсов. В статье 21 указано, что, как правило, использование подземных вод питьевого качества для нужд, не связанных с питьевым и бытовым водоснабжением, не допускается. При оценке качества питьевой воды следует руководствоваться ГОСТ 2874—82, а также указаниями Министерства здравоохранения СССР о предельно допустимых концентрациях вредных веществ. При выборе поверхностных вод, например при береговой инфильтрации, при ИВПВ и при устройстве подземных водохранилищ рекомендуется принимать во внимание ГОСТ 2701—84.

Общие указания по выбору источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения определяются ГОСТ 2761—84. Для предупреждения загрязнения Министерством здравоохранения СССР разработано «Положение о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого водоснабжения». Это положение утверждено главным государственным санитарным врачом Союза ССР [13]. В развитие этого положения ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР разработаны «Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ 2-го и 3-го поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения» [15].

При искусственном восполнении подземных вод Министерством здравоохранения СССР 26 марта 1979 г. утверждены «Санитарные

правила по устройству и эксплуатации водозаборов с системой искусственного восполнения подземных вод хозяйственно-питьевого назначения» [18]. При проектировании водозаборов следует учитывать «Классификацию эксплуатационных запасов и прогнозируемых ресурсов подземных вод» [8], а также «Инструкцию по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям питьевых и технических вод» [7].

В настоящее время не существует общесоюзного стандарта для оценки качества поливных вод при орошении, но ВНИИГиМ в 1984 г. разработаны рекомендации по оценке качества воды для орошения. В некоторых республиках разработаны отдельные рекомендации и руководства по использованию минерализованных вод (Туркменская ССР), дренажных вод (Узбекская ССР и Казахская ССР). Качество воды для орошения земель на юге Украины нормируется ГОСТ 25900—83.

Союзводпроектом в 1986 г. разработаны нормативы качества воды, основные показатели которых приведены в таблице.

Оценка качества воды для орошения и обводнения по величине общей минерализации

Качество воды по минерализации	Величина минерализации воды, г/л	Пригодность воды для целей орошения	Пригодность воды для обводнения
Пресная	0,2—0,5	Вполне пригодна	Вполне пригодна
Умеренно пресная	0,5—1	То же, при отсутствии свободного дренажа необходимы меры, предупреждающие накопление щелочей	То же
Слабосолоноватая	1—3	Пригодна для почв высокой проницаемости при хорошем дренаже с подбором солеустойчивых культур	Пригодна во все сезоны года
Умеренно солоноватая	3—5	Допустима в условиях хорошо обеспеченного дренажа с применением промывок и подбором солеустойчивых культур	Условно пригодна (в основном зимой и осенью)
Сильносоленая	5—10	Применима в случае крайней необходимости и в особо благоприятных условиях	Пригодна только осенью и зимой
Соленые воды и рассолы	10	Практически непригодны	Практически непригодны

Указанные в таблице нормативы уточняют с учетом состава растворенных солей.

1.4. Типы водозаборов подземных вод

Водозаборы подземных вод состоят как из отдельных сооружений (каптажных) для получения подземных вод, так и из их системы (водозаборов); одно каптажное сооружение также можно

назвать водозабором. Существуют следующие типы каптажных сооружений и водозаборов.

Каптажные сооружения для приема воды из восходящих и нисходящих источников (ключей, родников) рассмотрены в гл. 11. В зависимости от условий выхода на поверхность земли из водоносного горизонта каптажи могут иметь различную конструкцию: в виде дренажных труб со сборным колодцем и камерой, одной каптажной камеры, а иногда в виде шахты с отводной трубой. Такие сооружения в настоящее время встречаются сравнительно редко. Самое важное — расположить каптажные сооружения до выхода на поверхность земли, чтобы предупредить загрязнение подземных вод.

Горизонтальные водозаборы в виде дренажных труб и галерей, применяемые для захвата грунтовых вод, укладывают в вырытые канавы и располагают на глубине обычно не более 5—8 м. Из горизонтальных водозаборов вода поступает в сборный колодец (камеру).

Горизонтальные лучевые водозаборы пробуривают из центральной шахты-камеры и чаще применяют для захвата грунтовых вод, а в последнее время — и для захвата напорных вод. Сооружаются они сравнительно редко, как правило, на глубине до 10—30 м и более.

Горизонтальные водозаборы в виде штолен и кяризов (на глубинах до 20 м и более). Последние представляют собой древний способ каптажа подземных вод. В СССР они применялись в Закавказье и на юге Туркмении, за рубежом — в Иране, например. В настоящее время кяризы не сооружают, но ранее выполненные эксплуатируются и ремонтируются.

Шахтные колодцы используют чаще при небольших объемах потребления и глубине залегания подземных вод до 20—30 м. Для захвата подземных вод сооружают скважины различных конструкций: одиночные для небольших потребностей, несколько или даже множество скважин, которые объединяют в систему водозаборов суммарной производительностью до нескольких сотен и даже тысяч кубометров в секунду. Водозаборы из скважин применяют при захвате как грунтовых, так и артезианских подземных вод. Скважины или водозаборы из скважин применяют при глубине подошвы водоносного слоя более 8—10 м.

Для особых условий, например в районах многолетней мерзлоты, сейсмически активных, приморских и других специфических условий, сооружают водозаборы особой конструкции.

ГЛАВА 2. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАПАСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

2.1. Понятие об эксплуатационных запасах подземных вод и методы их оценки

Под эксплуатационными запасами подземных вод понимают их расход, который может быть получен на месторождении с помощью рациональных в технико-экономическом отношении водозаборных сооружений при заданном режиме эксплуатации и при качестве воды, удовлетворяющем требованиям целевого использования в народном хозяйстве в течение расчетного срока водопотребления. При оценке эксплуатационных запасов подземных вод, кроме того, необходимо учитывать положение уровней воды в них (динамических уровней), а также их изменение во времени. Классификация эксплуатационных запасов изложена в работе ГКЗ при Совете Министров СССР [8].

Эксплуатационные запасы подземных вод для проектирования водозаборных сооружений подсчитывают по результатам проведенных на месторождении детальных разведочных гидрогеологических работ и по данным эксплуатации подземных вод обычно с дополнительными разведочными работами. Эксплуатационные запасы подземных вод, утверждаемые для проектирования и эксплуатации, относятся к категориям *A*, *B* и *C*. Кроме того, по степени изученности выделяют предварительно оцененные эксплуатационные запасы по категории C_2, которые не могут входить в эксплуатационные запасы для проектирования и эксплуатации; однако они являются основанием для дальнейших исследований и уточнения запасов по более высоким категориям. Для перспективной предварительной оценки запасов подземных вод выделяют так называемые ресурсы *P*, которые оценивают согласно «Классификации» [8] на основе общего гидрогеологического анализа, теоретических предпосылок, геологического и гидрогеологического картирования, гидрохимических, гидрологических и водобалансовых исследований, санитарных условий, отражающих потенциальные эксплуатационные возможности использования подземных вод.

Применение классификации запасов подземных вод для проектирования и прогнозов использования их для водоснабжения и других целей в первую очередь определяется существом самой «Классификации» [8] и более детально «Инструкцией ГКЗ при СМ СССР» [7], а также «Методическим руководством ВСЕГИНГЕО по разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения» [9] и другими пособиями. Эксплуатационные запасы подземных вод по степени изученности, как отмечено выше, разделяются на 4 категории: от более изученных *A*, *B* и *C*, до предварительно оцененной C_2, а прогнозные ресурсы по степени обоснованности относятся к категории *P*. Детальные требова-

ния к различным категориям изученности запасов подземных вод изложены ниже.

Эксплуатационные запасы подземных вод по народнохозяйственному значению разделяются на две группы: балансовые и забалансовые. Первые экономически целесообразно использовать уже сейчас при существующей или осваиваемой технике извлечения подземных вод водозаборами; использование вторых в настоящее время технически невозможно, экономически нецелесообразно или ненадежно. Забалансовые эксплуатационные запасы подземных вод учитывают и подсчитывают, если доказана их возможность реализации в перспективе. При подсчете эксплуатационных запасов подземные воды подразделяют по гидрогеологическим, технико-экономическим, санитарным и другим показателям их применения.

При проектировании и освоении запасов подземные воды делят на группы исходя из сложности гидрогеологических условий, а также из экономических факторов и надежности количественного определения расхода подземных вод, получаемых из водозаборов. При этом имеется в виду достоверность определения эксплуатационных запасов подземных вод от достаточно гарантийного по категории *А* до несколько менее достоверного *В* и затем менее достоверного C_1. В «Классификации» и «Инструкции» выделяются три группы месторождений по признакам сложности гидрогеологических условий и, очевидно, точности количественных определений величины эксплуатационных запасов подземных вод. Для этих трех групп и определяется процент оценки эксплуатационных запасов по категориям *А*, *В* и *С*.

К первой группе относятся месторождения (участки) с простыми гидрогеологическими условиями, спокойным залеганием водоносных пород, малоизменяющейся и легкоопределяемой мощностью водоносного горизонта, однородными фильтрационными свойствами, ясно выделяющимися источниками формирования эксплуатационных запасов и благоприятными санитарными условиями (с учетом организации зон санитарной охраны). Все это определяет величины эксплуатационных запасов подземных вод с более надежной оценкой величины эксплуатационных запасов по категории *А* — не менее 40%, по категории *В* — 40% и по категории C_1 — 20%.

Ко второй группе месторождений относятся участки со сложными гидрогеологическими условиями: невыдержанностью мощности и строения водоносных горизонтов, неоднородностью фильтрационных свойств водовмещающих пород, сложностью гидрохимических условий. На таких участках разведка месторождений с высоким процентом оценки по категории *А* экономически нецелесообразна. Эксплуатационные запасы в основном (60%) оцениваются для проектирования по категории *В*, 20% — по категории C_1 и только не менее 20% — по категории *А*.

К третьей группе месторождений относятся участки с очень сложными гидрогеологическими условиями: высокой изменчивостью мощности и строения водоносных горизонтов, их фильтрационных свойств, а также гидрохимических и геотермических условий. В «Классификации» [8] отмечается, что разведка третьей группы месторождений с выявлением категории *А* нецелесообразна вследствие высокой их стоимости и низкой эффективности. Эксплуатационные запасы подземных вод третьей группы месторождений оцениваются по категориям *В* — 70% и C_1 — 30%. К этой же группе в «Классификации» относится искусственное восполнение подземных вод (ИВПВ) и, видимо, подземные водохранилища. Однако следует отметить, что в настоящее время расчеты ИВПВ, особенно береговые водозаборы и восполнение грунтовых вод при простых условиях с инфильтрационными бассейнами, разработаны довольно хорошо. Поэтому, по нашему мнению, при таких условиях можно представлять их в ГКЗ по второй группе.

Разведанные и рассчитанные балансовые запасы подземных вод для проектирования должны быть утверждены ГКЗ или в соответствующих случаях территориальными комиссиями по запасам полезных ископаемых Министерства геологии СССР (ТКЗ) при категориях изученности запасов подземных вод по табл. 2.1.

Таблица 2.1. Таблица категорий эксплуатационных запасов подземных вод (по сложности условий)

Категории запасов	Группы эксплуатационных запасов, %		
	первая (простые условия)	вторая (сложные условия)	третья (очень сложные условия)
А+*В*, не менее	80	80	—
В том числе:			
А, не менее	40	20	—
В, не менее	—	—	70
C_1	20	20	30

В случае, если возможность освоения подземных вод для водоснабжения или орошения ниже соотношений балансовых запасов, приведенных в табл. 2.1, то это решается при утверждении запасов в ГКЗ СССР (ТКЗ) в виде исключения.

Во всех случаях должно быть доказано, что качество получаемых подземных вод или не изменится или изменится, но в допустимых пределах (ГОСТ 2874—82 для водоснабжения) и в зависимости от требований потребителя. Условия эксплуатации подземных вод должны быть достаточно изучены для получения исходных данных для проектирования на расчетный срок (уровни воды и ее расход по элементам водозабора).

Для утверждения промышленных запасов (категории *А*, *В* и C_1), кроме того, должны быть обоснованы и предварительно оценены запасы по категории C_2, а именно: геологические и гидро-

геологические условия месторождения подземных вод устанавливаются в общих чертах по данным единичных разведочных скважин либо по аналогии с более изученными участками. Качество воды при этом оценивают по единичным анализам проб воды и соответствующим требованиям к этому качеству. При этом эксплуатационные запасы подземных вод подсчитывают по данным опробования единичных разведочных выработок, анализу гидрогеологических условий, аналогии и экстраполяции данных в близких условиях, оцененных по более высоким категориям изученности.

Для перспективной оценки подземных вод определяют запасы по категории *P* как прогнозируемые на основании карт гидрогеологических съемок, предполагаемых геологических и гидрогеологических условий, учитывая возможность обнаружения новых месторождений подземных вод с учетом аналогии эксплуатации подземных вод в предполагаемых условиях. Следует отметить, что данные гидрогеологических съемок, особенно в масштабах 1 : 50 000 и крупнее, следует использовать при оценке запасов всех трех упомянутых групп месторождений по их изученности.

Необходимо учесть, что эксплуатационные запасы подземных вод со временем могут подлежать переутверждению в ГКЗ СССР (и ТКЗ) в случае пересмотра кондиций, требований, стандартов, технических условий, технологии эксплуатации, реконструкции водозаборных сооружений, нарушения природных и в особенности водохозяйственных, а также санитарных условий; все это должно производиться с учетом данных по режиму подземных вод при их эксплуатации на рассматриваемом участке.

В настоящее время общепризнано, что эксплуатационные запасы подземных вод формируются за счет естественных их запасов — емкостных (и упругих), а также за счет привлекаемых в процессе эксплуатации и искусственного их восполнения.

Вышеприведенное понимание формирования эксплуатационных запасов подземных вод является схемой, которая уточняется для разных гидрогеологических условий. Следует иметь в виду, что при эксплуатации запасов подземных вод в конкретных условиях первоначальный (статический) уровень их снижается, что, конечно, изменяет гидродинамические условия. Только при каптаже источников (ключей) можно создать условия эксплуатации их с очень небольшим понижением уровня воды, но и в этом случае нередко понижают естественный уровень воды. При эксплуатации подземных вод со свободным зеркалом емкостные запасы поступают в водозаборы вследствие снижения их уровня, а в артезианских (напорных) системах используются в этом случае упругие запасы водоносного горизонта. Получение привлекаемых запасов за счет поверхностных вод возможно, например, при эксплуатации береговых водозаборов: вода из рек, водохранилищ и озер поступает в водоносный горизонт в результате понижения уровня (откачка воды) в водозаборах и водоносном горизонте.

2.2. Гидрогеологические исследования

Эксплуатационные запасы и ресурсы подземных вод определяют на основе результатов гидрогеологических исследований различных типов месторождений подземных вод (см. разд. 1.1) и групп их эксплуатационных запасов (см. табл. 2.1). Исследования проводят по трем основным направлениям: 1) площадное картирование разного масштаба на основании гидрогеологических съемок; 2) предварительная разведка; 3) детальная разведка.

Гидрогеологические съемки и их картирование осуществляют в следующих масштабах: от 1 : 5 000 000 до 1 : 500 000 — мелкомасштабные; от 1 : 200 000 до 1 : 100 000 — среднемасштабные; от 1 : 50 000 до 1 : 25 000 и более детальные — крупномасштабные.

В настоящее время СССР охвачен в основном среднемасштабной съемкой М 1 : 200 000. Такую съемку выполняют в основном путем маршрутных исследований, картировочного бурения с гидрогеологическим опробованием скважин, а также с помощью аэрофотосъемки и космосъемки с использованием данных по типовым участкам; используют наблюдения за режимом подземных вод и сведения по эксплуатации подземных вод. При картировании, в особенности для изучения глубоких подземных вод, используют геофизические исследования. При опробовании скважин оценивают химический состав подземных вод. Обязательно учитывают геологические данные. Материалы гидрогеологического картирования необходимы для оценки перспектив использования подземных вод и их разведки — предварительной и затем детальной.

На основании данных съемок с учетом результатов теоретических разработок оценивают прогнозируемые ресурсы подземных вод и намечают месторождения подземных вод для разведки, а также оценивают ресурсы подземных вод по категории *Р*.

Предварительная разведка подземных вод имеет своей целью выделить и обосновать месторождения подземных вод для детальной разведки. Основным методом предварительной разведки является бурение разведочных скважин и опробование их с определением изменения гидрогеологических показателей как на участке месторождения, так и за его пределами, определяющими условия формирования эксплуатационных запасов подземных вод на указанном месторождении. На основании данных разведки определяют количественные эксплуатационные запасы подземных вод с предварительным экономическим анализом вариантов выбора водозаборов. Состав разведочных работ зависит от гидрогеологических условий, которые оценивают по сложности (см. табл. 2.1), а также от методов оценки эксплуатационных запасов подземных вод (см. разд. 2.3): гидродинамических (аналитических с моделированием), гидравлических, методов аналогии и комбинированных. В состав разведочных работ входят бурение разведочных и опытно-разведочных скважин с откачками для определения усло-

вий залегания и строения водоносных горизонтов, дебитов и понижений уровней, коэффициентов фильтрации и других параметров, необходимых для оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Используют также геофизические методы и аналогию.

На основании предварительной разведки эксплуатационные запасы оцениваются по категориям в основном C_2 и C_1 и частично B; при простых условиях и наличии надежного аналога возможно часть эксплуатационных запасов оценивать по категории A. При оценке эксплуатационных запасов подземных вод по данным предварительной разведки целесообразно включать предварительный экономический анализ вариантов водозаборов и их надежность, а также анализ санитарных условий. Поэтому на стадии предварительной разведки следует привлекать специалистов по использованию подземных вод, так как выбирается участок (месторождение) для детальных гидрогеологических исследований. При соответствующих условиях использования подземных вод, например при варианте береговых водозаборов, включают гидрологические и гидрометеорологические исследования, для которых в основном используют данные Гидрометслужбы.

Детальные гидрогеологические исследования на новых месторождениях и исследования с анализом эксплуатации на месторождениях с работающими водозаборами должны быть достаточными для оценки эксплуатационных запасов проектируемых водозаборов; при этом категории изученности для разной степени изученности должны быть не ниже указанных в табл. 2.1.

Детальная разведка с целью увеличения производительности участков, эксплуатирующих подземные воды, ведется с меньшим объемом бурения и опробования скважин, чем на новых участках, и основывается преимущественно на анализе эксплуатации подземных вод. Экономический анализ варианта водозаборов с утверждаемыми для них эксплуатационными запасами подземных вод должен согласовываться с проектными организациями.

Основной метод гидрогеологических исследований подземных вод при детальной разведке — бурение скважин и опробование их откачками для получения расчетных параметров. При простых гидрогеологических условиях обычно осуществляют бурение и опробование опытных и опытно-разведочных скважин с наблюдательными скважинами для определения мощности, коэффициентов фильтрации и других параметров водоносного горизонта; определяют также дебиты и понижение уровней в скважинах. Для сложных гидрогеологических условий может оказаться необходимым проведение опытной откачки из части намечаемого водозабора подземных вод с определением производительности динамических уровней и качества воды. Для очень сложных гидрогеологических условий кроме опытных наблюдательных и дополнительных разведочных скважин с откачками из них и определения параметров водоносных горизонтов, как правило, проводятся опытные и опытно-эксплуатационные откачки из водозабора подземных вод. При

изыскании источников (ключей, родников) проводят наблюдения и собирают данные в течение трех лет с анализом формирования сезонной и многолетней изменчивости дебита источника и качества воды при расширении периода наблюдений минимум до 11—13 лет.

Во всех указанных выше условиях при оценке эксплуатационных запасов подземных вод для проектирования необходим анализ условий формирования эксплуатационных запасов (возможно, с гидрологическими и гидрометеорологическими показателями) с определением качества воды и санитарных условий, а также оценкой возможности изменений всех показателей эксплуатационных запасов подземных вод на расчетный период — обычно 25 лет. Однако при постепенном строительстве и освоении водозаборов подземных вод точность определения эксплуатационных запасов подземных вод особенно важна, в частности, на ближайшие 10 лет; при эксплуатации производительность водозаборов уточняется, и для дальнейшего использования лучше производить проверку расчетов эксплуатационных запасов.

2.3. Основы расчетов эксплуатационных запасов подземных вод

В зависимости от условий эксплуатационные запасы могут использоваться при установившемся и неустановившемся режимах. В первом случае при сохранении природных и водохозяйственных условий запасы рассчитываются на неограниченный срок, во втором — на ограниченный срок с учетом допустимого понижения уровня.

Примером условно установившегося режима подземных вод могут служить береговые инфильтрационные водозаборы при обеспеченном минимальном уровне и расходе поверхностных вод, хотя происходит сезонное и многолетнее изменение уровней и расходов. При упругом режиме эксплуатации артезианских вод происходит постепенное снижение уровней, и расчет эксплуатационных запасов подземных вод ведется на допустимое снижение уровней в эксплуатационных скважинах на определенный срок. Однако имеются случаи, например при эксплуатации сеноманского артезианского водоносного горизонта в Киеве, когда при постепенном увеличении производительности и понижении уровня воды началось преобладающее питание из Днепра, и при постоянной производительности водозаборов режим эксплуатации стал стремиться к установившемуся типу. Таким образом, эксплуатационные запасы подземных вод следует рассчитывать для соответствующих гидрогеологических условий по установившемуся и неустановившемуся режимам с учетом положения уровней и возможных изменений гидрологических и гидрогеологических условий. При таких расчетах необходимо предусматривать возможность сохранения требуемого качества воды. Последнее особенно важно, ког-

да в эксплуатационные запасы входят привлекаемые запасы поверхностных вод, например при береговых водозаборах. В этом случае особенно важно предусматривать сохранение допустимого качества поверхностных вод, питающих подземные воды. Такое же требование должно предусматриваться и для систем искусственного восполнения подземных вод. Методы расчета эксплуатационных запасов подземных вод для проектирования водозаборов определяются сложностью гидрогеологических и в определенных случаях гидрологических и метеорологических (включая климат) условий. Важны также методика и детали изысканий и, в частности, расположение разведочных и опытных скважин, а также другие способы вскрытия водоносных горизонтов, методика опробования откачками, определение расчетных параметров, применение геофизических исследований, время исследований и ряд других условий. Кроме того, следует иметь в виду, что в зависимости от гидрогеологических условий подземные воды добывают различными видами водозаборов; скважинами, шахтными колодцами, горизонтальными и лучевыми водозаборами, различными каптажами источников, что также влияет на выбор расчетных формул. Затем следует учитывать схематизацию гидрогеологических условий с осреднением расчетных параметров.

В настоящее время при расчетах эксплуатационных запасов подземных вод применяют следующие методы расчетов: гидродинамический с применением вычислительных и аналоговых машин, гидравлический, балансовый, метод аналогий и комбинированный; следует учитывать также неравномерность потребления воды. При водоснабжении населенных пунктов в летнее время потребность увеличивается (сезонная) и меняется в течение суток (часовая); часовая неравномерность может регулироваться с резервуарами.

При использовании подземных вод для орошения потребность в воде появляется в вегетационный, предпосевной и послеуборочный периоды, следовательно, налицо сезонная неравномерность потребления. Возможности использования подземных вод с учетом привлекаемых эксплуатационных запасов в ряде случаев осложняются неравномерностью естественного питания подземных вод и их расхода. Такой пример можно отметить в конусах выноса. При сезонной и многолетней неравномерности питания, а также стока подземных зон в конусах выноса и одновременной сезонной неравномерности потребления воды для орошения можно в ряде случаев создать хранилища подземных вод.

Неравномерность возможности привлечения эксплуатационных запасов подземных вод можно отметить, например, при эксплуатации береговых водозаборов в случае неравномерных расходов и уровней реки. Очень важно учитывать эксплуатацию подземных вод при установившемся и неустановившемся режимах. При установившемся режиме производительность водозаборных сооружений и уровень подземных вод будут постоянны. При неустановившемся режиме могут возникнуть следующие ситуации: 1) произ-

водительность постоянна при изменяющемся уровне воды; 2) производительность изменяется при постоянном уровне воды; 3) изменяются производительность и уровень воды. Чаще расчет ведется при заданном и возможном расходе воды.

При расчетах эксплуатационных запасов подземных вод следовало бы учитывать их достоверность. В табл. 2.1 на основе категорий запасов и их суммы определяют три группы месторождений по сложности оценки. Более достоверной является первая группа (простые гидрогеологические условия) и наименее достоверной — третья группа (весьма сложные гидрогеологические условия). Однако и при очень сложных условиях, если провести опытно-эксплуатационный отбор из водозабора в неблагоприятный период, а также правильно учесть формирование подземных вод в дальнейшем, можно получить достаточно достоверное значение эксплуатационных запасов подземных вод. Следует также отметить, что эксплуатационные запасы получают из водозаборов подземных вод, которые могут изменять свои характеристики (износ насосов, недопустимое падение уровней в скважинах, заиление фильтров и проч.), что повлияет на их производительность. Поэтому при изменении эксплуатационных запасов следует также анализировать работу водозаборов. Вопрос об эксплуатационных запасах подземных вод и их гидрогеологической оценке более подробно освещен в работах Л. С. Язвина, Б. В. Боревского и др. [9].

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

3.1. Водозаборы подземных вод и схемы водоснабжения

Проектирование водозаборов подземных вод является частью проектирования водопроводных или других систем, т. е. комплекса всех сооружений водоснабжения, орошения, систем охлаждения и т. д. При этом следует учитывать указания СНиП 2.04.02—84. Хозяйственно-питьевое водоснабжение пользуется приоритетом перед другими потребителями подземных вод, что указано в «Основах водного законодательства Союза ССР и союзных республик» [10]. Это определяется обычно высоким качеством пресных подземных вод и их лучшей защищенностью от загрязнения. Подземные воды следует проектировать в качестве источника с учетом комплексного использования водных ресурсов, разработанного в составе генеральных планов района. Потребный расход подземной воды в проекте водоснабжения, орошения и др. определяется по расчету потребности, а также с учетом анализа природных, технических, экономических и санитарных условий возможных источников и с учетом изменения этих условий.

Подземные воды, как отмечалось, добывают специальными устройствами — водозаборами разных типов с учетом условий залегания подземных вод, их формирования и обеспечения потребного расхода в течение расчетного срока, а в ряде случаев и в перспективе. Этот расход должен удовлетворять потребителя не только с учетом изменения условий и потребности по годам, но также по месяцам, дням и часам водопотребления. При этом изменение расхода, особенно в течение суток, можно регулировать с учетом всех условий как изменением производительности водозаборов, так и включением регулирующих емкостей в систему сооружений водопровода. Например, в системе водопровода Вильнюса неравномерность расхода в течение суток регулируется за счет воды резервуаров, а береговой водозабор подземных вод работает с постоянной производительностью, что оказалось весьма экономичным.

Водозаборы в системе орошения обычно работают с неравномерной производительностью вследствие изменения потребности в воде в течение года, месяцев, дней и даже часов. Однако по экономическим соображениям рекомендуется исходя из реальных условий организовать равномерную работу водозаборов подземных вод в поливной период. Для орошения целесообразно использовать подземные воды в районе поливных площадей, а для хозяйственно-питьевого водоснабжения по санитарным соображениям водозаборы, в том числе береговые, целесообразно удалять от потребителя на 3—10 км выше по течению реки. При использовании для хозяйственно-питьевого водоснабжения артезианских вод, хорошо защищенных от загрязнения, возможно рассредоточенное распределение водозаборов даже на территории города, что удешевляет распределительную сеть.

3.2. Надежность систем водозаборов подземных вод

Нормативы, на основе которых осуществляют проектирование водозаборов подземных вод, включают в себя как обязательные пособия (основы законодательств, стандарты, СНиПы и проч.), так и инструкции и рекомендации [7—10; 13—19].

Надежность работы систем водозаборов с их оборудованием определяется достоверностью оценки эксплуатационных запасов подземных вод (гл. 2.3), надежностью расчетов. Достоверность оценки эксплуатационных запасов подземных вод практически вытекает из табл. 2.1.

Производительность водозаборов, например береговых, зависит от положения уровней в поверхностных водах и, в частности, от самого низкого уровня воды, например в реке, при котором обеспечиваются необходимый расход и проектная производительность водозаборов, а также от заиления дна водоема; последнее определяет степень сопротивления движению воды, а следовательно, и уровень ее в водозаборе. Следует иметь в виду, что надежность

работы водозаборов по оценке эксплуатационных запасов в соответствии с категориями достоверности (см. табл. 2.1) уточняется, особенно в первый период эксплуатации, и тогда она возрастает.

При оценке надежности работы водозаборов существенное значение имеет конструкция самих водозаборов, а также надежность насосов, водоводов и др. Конструкция водозаборов должна учитывать изменение производительности во времени, в том числе по заиливанию и регенерации фильтров скважин. Необходимо также обеспечить нормальную работу погружных электронасосов в скважинах с учетом изменения динамических уровней и износа самих электронасосов, особенно в бесфильтровых скважинах из водоносных песков. Важно также учитывать изменение санитарных условий и возможность загрязнения подземных вод. Все это следует проверять при изучении режима эксплуатации подземных вод, во время наблюдений за охраной подземных вод от загрязнения и контроля работы оборудования.

Для оценки надежности береговых водозаборов из подземных вод расчетную обеспеченность можно принимать по табл. 3.1.

Таблица 3.1. Обеспеченность минимальных среднемесячных расходов воды, их допустимое снижение и длительность допустимого перерыва для разных категорий водозаборов

Характеристика водопотребителя	Категория водозаборов	Процент обеспеченности	Допустимое снижение подачи, %, среднемесячного расчетного расхода, длительность снижения расхода, допустимый перерыв
Город с населением более 50 000 чел. Крупные и важные предприятия	I	97	Не более 30
Город с населением до 50 000 чел. Средние предприятия, групповые сельскохозяйственные водопроводы	II	95	То же Не более 10 сут Перерыв не более 6 ч
Города и населенные пункты до 500 чел. Местные предприятия Системы сельскохозяйственного обводнения (пастбища) отдельных пунктов. Орошение	III	90	Не более 30 Не более 15 сут Перерыв не более 24 ч

При среднемесячных расходах должна проверяться необходимая регулирующая емкость водоносного горизонта для обеспечения подачи воды при минимальных внутримесячных расходах и соответствующих минимальных уровнях в скважинах. Оценку надежности водозаборов, состоящих из системы скважин, можно принять при наличии резервных скважин и квалифицированном обслуживании (качественный ремонт и своевременная замена неисправного оборудования). При этом число резервных скважин должно быть не менее указанного в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Число резервных скважин в зависимости от категории водозабора (см. табл. 3.1) и числа рабочих скважин

Число рабочих скважин	Число резервных скважин при категориях водозабора		
	I	II	III
1—4	1	1	1
5—12	2	1	—
13 и более	20%	10%	—

Надежность других водозаборов следует принимать с учетом сложности гидрогеологических, технических, санитарных и прочих условий, а также результатов детального изучения.

ГЛАВА 4. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СКВАЖИНЫ НА ВОДУ

4.1. Способы бурения скважин

Водозаборы из скважин наиболее распространены в практике хозяйственно-питьевого водоснабжения. Их сооружают для добычи подземных вод, залегающих на глубине более 10 м при мощности водоносного пласта не менее 5—6 м. Глубина водозаборных скважин иногда превышает 1000 м. В системах сельскохозяйственного водоснабжения водозаборные скважины по распространенности уступают лишь шахтным колодцам, однако диапазон возможного применения скважин значительно шире.

В практике сооружения скважин на воду получили распространение следующие способы бурения: вращательный с прямой промывкой, вращательный с обратной промывкой, вращательный с продувкой воздухом и ударно-канатный. Условия применения различных способов бурения определяются собственно техническими и технологическими особенностями буровых установок, а также качеством работ по сооружению скважин. Условия применения различных способов бурения скважин на воду применительно к существующему станочному парку приведены в табл. 4.1. Подробные характеристики буровых установок приведены в справочнике [22]. Следует отметить, что при выборе способа бурения скважин на воду необходимо учитывать не только скорость проходки скважин и технологичность метода, но и обеспечение таких параметров вскрытия водоносного пласта, при которых деформация пород в призабойной зоне наблюдается в минимальной степени и ее проницаемость не снижается в сравнении с пластовой.

При проектировании водозаборных скважин способ бурения выбирают исходя из геологических и гидрогеологических условий, тре-

буемого диаметра скважин, технико-экономической целесообразности применения способа бурения в конкретных условиях. Технико-экономическая целесообразность применения того или иного способа бурения определяется с учетом трех основных показателей: качества и долговечности скважины, продолжительности и стоимости ее сооружения, однако решающим должно быть производство долговечных скважин, сохраняющих неизменной водопроницаемость призабойной зоны длительные периоды времени.

При выборе способа бурения водозаборных скважин следует руководствоваться табл. 4.1.

Таблица 4.1. Рекомендации по выбору способа бурения

Способ бурения	Условия применения
Ударно-канатный	В рыхлых и скальных породах при глубине скважин до 150 м и начальном диаметре скважины более 500 мм
Роторный с прямой промывкой	В рыхлых и скальных породах при любой глубине скважин с начальным диаметром до 500 мм и с промывкой чистой водой, полимерными или глинистыми растворами
Комбинированный (ударно-канатный и роторный с прямой промывкой)	При глубине скважин более 150 м на ненапорные и слабонапорные водоносные горизонты, представленные рыхлыми отложениями. До кровли водоносного горизонта — роторный с глинистым раствором, по водоносному горизонту — ударно-канатный
Роторный с обратной промывкой	В породах I—IV категорий с содержанием в рыхлых и связных отложениях не более 10% валунов при глубине скважин до 200 м
Колонковый	В скальных породах при диаметре скважин до 150—200 мм при глубине бурения до 150 м
Реактивно-турбинный	При глубинах 500—1000 м и более и больших диаметрах скважин

Для повышения эффективности прохождения скальных пород ударно-канатным способом рекомендуется применять виброударные буровые снаряды ВС-1 и ВС-2, разработанные ВНИИГС и трестом Промбурвод (табл. 4.2).

Таблица 4.2. Техническая характеристика виброударных буровых снарядов

Характеристика	Марка снаряда	
	ВС-1	ВС-2
Диаметр бурения, мм	250—300	350—400
Масса снаряда, кг	935 с долотом ∅ 250 мм	1500 с долотом ∅ 350 мм
Высота снаряда без канатного замка, мм	6050	5430

Виброударные буровые снаряды обеспечивают нанесение по забою посредством подпружиненного ударника серии дополнительных ударов в момент контакта долота с породой в промежутке между основными ударами. При этом скорость бурения возрастает в 1,5—2 раза. Особенности бурения скважин с применением виброударных снарядов изложены в работе [24]. При бурении скважин роторным способом с глинистой промывкой не всегда обеспечивается вскрытие водоносного горизонта без существенной глинизации стенок скважины, а последующее освоение не устраняет полностью последствий глинизации. Поэтому значительная часть гидравлических потерь приходится на призабойную зону скважины, что существенно уменьшает величину допустимого понижения уровня воды в эксплуатационной скважине. Кроме того, при закольматированной призабойной зоне скважин срок их эффективной службы обычно не превышает 2—3 лет. В связи с тем, что по этой причине сооружаются малодебитные водозаборные скважины, и в последние годы при вскрытии водоносных пластов опробованы безглинистые растворы и растворы из быстро разлагающихся соединений, обоснован и опробован способ вскрытия песчаных водоносных горизонтов водогипановыми растворами. Эти растворы характеризуются повышенной вязкостью: в водном растворе с концентрацией от 1 до 5 % гипана-1 вязкость по СПВ-5 изменяется от 16 до 27 с, а при применении гипана-0,7 — от 18 до 72 с. Повышенная плотность раствора способствует улучшенному выносу шлама из скважины, существенно уменьшая поглощение промывочной жидкости вследствие коагуляции шлама в растворе ионами поливалентных металлов. Расход водогипановых растворов более чем в 3 раза ниже расхода технической воды при бурении в аналогичных условиях. Процесс декольматации пласта при вскрытии его водогипановым раствором оказывается менее затруднительным, чем разглинизация, и продукты коагуляции гипана легко вымываются в ходе прокачки скважины.

Дополнительным преимуществом водогипановых растворов является их ингибирующее действие на размыв проходимых глинистых отложений.

Технология проходки скважин с водогипановыми растворами аналогична обычной с прямой промывкой, но обязательным условием является непрерывность водоснабжения. Объем раствора изменяется в зависимости от фильтрационных свойств пород и находится в пределах от 5 до 20 м^3. Рекомендуемая концентрация гипана (по гипану-1) в растворе — 3,5 %. При вскрытии водоносных горизонтов недопустимо смешивание водогипанового раствора с глинистым раствором ввиду образования чрезвычайно трудно удаляемой из призабойной зоны глиногипановой корки, которая не только кольматирует водоносный пласт, но и затрудняет удаление из пласта скоагулированного гипана. При нахождении непосредственно над водоносным пластом не перекрытых трубами глинистых пород вскрытие водоносного горизонта водогипановым

раствором следует осуществлять с подачей промывочной жидкости на сброс.

Распадающаяся промывочная жидкость, предложенная во ВНИИГиМе, состоит из воды и модифицированного крахмала, который добавляют к воде в количестве 4—5 % по массе. Допустимо использование водной суспензии, содержащей 3 % крахмала и 3 % бентонитовой или местной глины. Приготовленная промывочная жидкость распадается через 3—4 сут, однако ее распад может быть ускорен при использовании фермента — амилосубтилина, добавляемого к сухому крахмалу в количестве 0,02—0,03 % по массе. Плотность крахмалоглинистого раствора около 1,02 г/см^3. Применение распадающихся растворов при бурении скважин на воду в Брянской, Саратовской областях и Калмыцкой АССР дало удовлетворительные результаты.

4.2. Типы, конструкции скважин и фильтров скважин

Типы и конструкции скважин. Проектирование конструкций скважин на воду регламентируется СНиП 2.04.02—84. В случае залегания на поверхности земли устойчивых скальных пород и отсутствии верховодки при ударно-канатном бурении допускается одноколонная конструкция скважины. При сооружении скважин в аллювиальных отложениях, содержащих грунтовые воды, скважину следует крепить двумя колоннами труб: кондуктором и фильтровой колонной, выводимой на поверхность земли.

При вскрытии в разрезе двух водоносных горизонтов, верхний из которых не намечено эксплуатировать, последний подлежит перекрытию глухой колонной. При большом количестве залегающих выше эксплуатационного горизонта водоносных пластов каждый из них необходимо перекрывать. При этом глухую колонну следует заглублять в водоупор. В скважинах, которые бурятся ударно-канатным способом, при значительных глубинах, учитывая большие выходы обсадных колонн, возможно применять несколько технических колонн. Выход колонн может быть существенно увеличен при применении вибромолота БВС-1. В устойчивых водоносных породах скважина может работать открытым забоем, в рыхлых водоносных отложениях следует предусматривать дополнительную фильтровую колонну, которая может выполнять роль водоподъемной.

При проходке скважин роторным способом с прямой и обратной промывкой скважину крепят двумя колоннами труб: кондуктором и эксплуатационной колонной. Затрубное пространство кондуктора и межтрубное пространство кондуктора и эксплуатационной колонны цементируют. Это позволяет надежно изолировать неэксплуатируемый водоносный горизонт. При необходимости установки в скважину насоса, превышающего по габаритам внутренний диаметр эксплуатационной колонны, необходимо приме-

нять конструкцию скважины с установкой эксплуатационной или фильтровой колонны впотай на сальнике с подбашмачной цементацией. В этом случае эксплуатационная колонна выше башмака технической колонны имеет муфту с левой резьбой и сальник, что позволяет отвернуть верхнюю часть колонны.

Весьма проста и экономична одноколонная конструкция скважины с фильтром на сальнике, устанавливаемом впотай. Эту конструкцию следует по возможности применять чаще, где это допускают геологические и гидрогеологические условия.

При каптаже водоносных горизонтов, приуроченных к тонко- и мелкозернистым породам, следует предусматривать возможность устройства двухслойной гравийной или гравийно-песчаной обсыпки с установкой вспомогательной колонны.

Типы и конструкции фильтров скважин. Фильтры скважин на воду должны обеспечивать свободный доступ воды в скважину, надежно защищать ее от пескования при минимальных гидравлических потерях, обеспечивать устойчивую работу скважин в течение длительного времени, а в случае кольматажа водоприемной поверхности допускать возможность проведения восстановительных мероприятий с использованием различных реагентов-растворителей или совместного импульсного и реагентного восстановления производительности скважин.

Гидравлические исследования различных конструкций фильтров показывают, что основные потери напора приходятся на контактную зону каркаса (водоприемную поверхность) и гравийной обсыпки (водовмещающей породы).

С учетом принципа наложения гравия или пород на водоприемную поверхность фильтра скважин на воду их можно разделить, как показано на рис. 4.1.

Наибольшее распространение нашли частицезадерживающие фильтры, которые включают фильтры-каркасы и фильтры с дополнительной водоприемной поверхностью. В этих конструкциях эффект предотвращения пескования достигается таким подбором размера отверстия относительно размера частиц водоносных пород или гравийной обсыпки, при котором соблюдаются либо критерии геометрической непросыпаемости, либо расчет ведется на формирование в контактной зоне естественного фильтра за счет сводообразующих частиц. В этих конструкциях неизбежны некоторые контактные гидравлические потери, достигающие максимума в случае фильтров с круглой перфорацией при d_{50} (d_{50} — размер частиц водоносных пород или гравийной обсыпки, соответствующий 50 %-ному содержанию в пробе), равном диаметру отверстия. Контактные потери уменьшаются соответственно при увеличении d_{50} контактирующих с фильтром частиц.

Фильтры с отклонителем гравия характеризуются наличием таких элементов водоприемной поверхности, при которых исключается прямое наложение водоносных пород или гравийных частиц на фильтр. В качестве таких элементов используют мостооб-

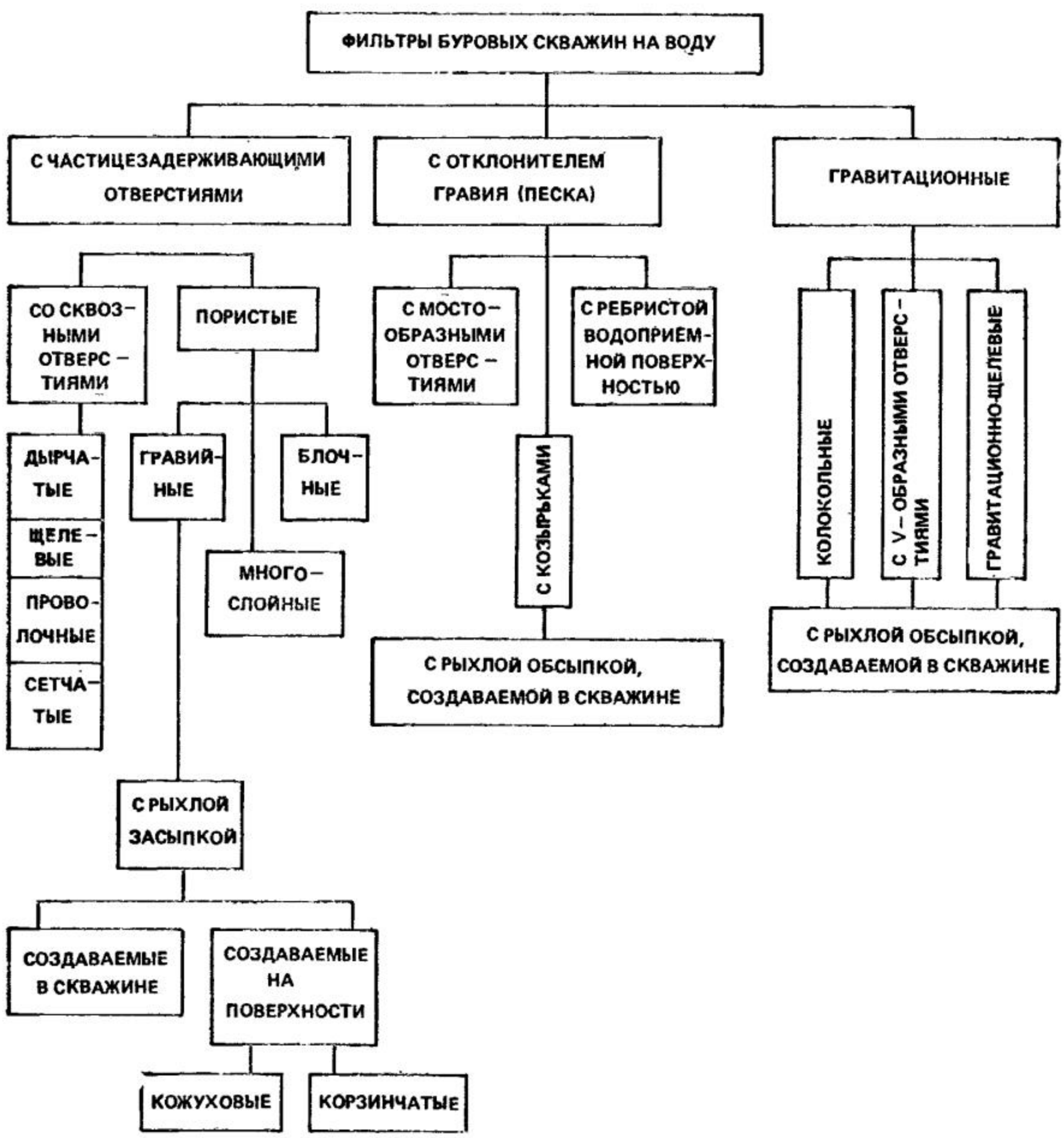


Рис. 4.1. Классификация фильтров водозаборных скважин

разные отверстия, козырьки и сложный профиль фильтровых отверстий, а также ребристую водоприемную поверхность.

В гравитационных конструкциях устраивают широкие водоприемные отверстия, в которых грунт удерживается от выноса под действием силы тяжести. К ним относятся колокольные, чашечные, тарельчатые, зонтичные, донные и другие конструкции.

Данные об основных типах фильтров и области их применения приведены в табл. 4.3. В ней сформулированы общие требования к фильтрам и диапазоны их использования. В каждом конкретном случае конструкцию фильтра следует выбирать в соответствии с излагаемой ниже методикой. Все охарактеризованные конструкции возможно применять с контуром рыхлой гравийной обсыпки, создаваемой на забое водозаборной скважины.

Таблица 4.3. Основные типы фильтров и область их применения

Типы фильтров	Материалы для изготовления	Особенности конструкции	Область применения
1	2	3	4
Фильтры с частицезадерживающими отверстиями			
1. Фильтры на опорных каркасах из труб с круглой и щелевой перфорацией:			
а) трубчатые с круглой и щелевой перфорацией	Трубы металлические, пластмассовые (полиэтиленовые, поливинилхлоридные, стеклопластиковые), керамические, асбестоцементные, фанерные	Скважность трубчатого каркаса фильтра 20—25 %. Диаметр отверстий и ширина щелей определяются размером преобладающих фракций породы или обсыпки	Во всех видах водоносных пород при всех глубинах скважин
б) с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки	Трубы бурового сортамента с круглой или щелевой перфорацией. Прутковая сталь марки Ст3 ∅ 5—10 мм. Проволока из нержавеющей стали ∅ 3—4 мм	Скважность каркаса 20—25 %. Диаметр круглых отверстий 15—25 мм, ширина щелей 10—30 мм, длина 250—300 мм. Скважность водоприемной поверхности до 60 %. Зазор между витками проволоки определяется размером частиц или обсыпки. Намотка проволоки осуществляется поверх подкладочных стержней	Гравийно-песчаные отложения с крупностью частиц от 1 до 10 мм, крупные пески с преобладающим размером частиц 1—2 мм
в) с водоприемной поверхностью из штампованного стального листа с отверстиями различной конфигурации	Металлические и неметаллические трубы с круглой и щелевой перфорацией. Проволока из нержавеющей стали ∅ 3—4 мм или из простой стали с покрытием. Нержавеющая листовая сталь толщиной 0,8—1 мм, штампованная	Каркас такой же, как в п. 1б. Скважность водоприемной поверхности из штампованного листа до 30 %. Размер отверстий определяется крупностью фракций грунта или гравийной обсыпки. Штампованный лист накладывается на трубчатый каркас по прово-	Гравийно-песчаные отложения с крупностью частиц от 1 до 10 мм, крупные пески с преобладающим размером частиц 1—2 мм

		лочной спирали или по подкладочным стержням	
г) с водоприемной поверхностью из сеток	Металлические и неметаллические трубы с круглой или щелевой перфорацией. Проволока из нержавеющей стали. Сетка из нержавеющей стали, латуни или комбинированные пластмассово-металлические сетки галунного или квадратного плетения	Каркас такой же, как в п. 1б. Скважность водоприемной поверхности 30—50 %. Сетка накладывается на проволочную спираль из нержавеющей стали или на продольные прутья диаметром 5—10 мм	Среднезернистые пески с преобладающей крупностью частиц 0,25—0,5 мм и мелкие пески с крупностью частиц 0,1—0,25 мм
2. Фильтры на опорных каркасах из стержней (каркасно-стержневые):			
а) с вертикальными щелями	Сталь прутковая марок Ст5 и Ст7 ∅ 10, 12, 14, 16 мм. Соединительные патрубки из труб бурового сортамента	Скважность каркаса до 60 %. Ширина щелей зависит от преобладающих фракций породы или обсыпки	Полускальные, неустойчивые породы, щебень, галечники с крупностью частиц 20—100 мм. В скважинах глубиной до 200 мм
б) с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки	То же, что и для фильтров в п. 2а. Проволока из нержавеющей стали ∅ 2—4 мм	Опорный каркас по п. 2а с максимальным размером щелей. Скважность проволочной поверхности до 50—60 %. Размер зазора между витками определяется преобладающей крупностью частиц породы или обсыпки	Гравийно-песчаные отложения с крупностью частиц 1—10 мм, крупные пески с преобладающим размером частиц 1—2 мм
в) с водоприемной поверхностью из штампованного стального листа с отверстиями различной конфигурации	То же, что и для фильтра в п. 2а. Нержавеющая листовая сталь толщиной 0,8—1 мм, штампованная	Опорный каркас по п. 2а с максимальным размером отверстий. Водоприемная поверхность выполняется по п. 1в	Гравийно-песчаные отложения с крупностью частиц от 1 до 10 мм, крупные пески с преобладающим размером частиц 1—2 мм
г) с водоприемной поверхностью из сеток	То же, что и для фильтров в п. 2а. Сетка галунного или квадратного плетения по п. 1в. Подмотка из нержавеющей проволоки ∅ 2—4 мм	Опорный каркас по п. 2а Проволочная обмотка выполняет роль подкладочного элемента и навивается с большим зазором Водоприемным элементом слу-	Среднезернистые пески с преобладающей крупностью частиц 0,25—0,5 мм и мелкие пески с крупностью частиц 0,1—0,25 мм

Продолжение табл. 4.3

Типы фильтров	Материалы для изготовления	Особенности конструкции	Область применения
1	2	3	4
		жит сетка, подбираемая в зависимости от состава пород	
3. Гравийно-кожуховые	В соответствии с выбранной конструкцией каркаса. Сетка квадратного плетения из железной проволоки. Листовое кровельное железо штампованное	Опорный каркас конструкции 1-го и 2-го типов. Фильтрующим покрытием служит однослойная гравийная обсыпка, подбираемая в зависимости от состава водоносных пластов. Кожух изготовлен из сеток квадратного плетения или штампованного кровельного железа	Среднезернистые и мелкозернистые пески с преобладающей крупностью соответственно 0,25—0,5 мм и 0,1—0,25 мм
4. Гравийно-блочные на различном клее (цементе)	То же, что и для фильтров по п. 3. Фильтровые блоки из пористого бетона, пористой керамики, гранулированных пластмасс и других, изготовленных на основе синтетических клеев, применение которых в скважинах питьевого водоснабжения согласовано с Минздравом СССР	Опорный каркас конструкции 1-го и 2-го типов с максимальным размером проходных отверстий. Для неглубоких скважин (до 40 м) возможно применение бескаркасных фильтров. Водоприемным элементом является фильтрующий блок из сцементированных частиц	Мелкозернистые пески с размером частиц 0,1—0,25 мм при проектной производительности скважин до 5 л/с, при малом содержании в составе песков глинистых частиц, в скважинах, проходимых без глинистого раствора
Фильтры с отклонителем гравия			
1. Штампованные с мостообразными отверстиями	Просечной лист с мостообразными отверстиями из простой стали с антикоррозионным покрытием или из нержавеющей стали толщиной 3—7 мм	Скважность каркаса до 30 % (по площади отверстий на цилиндрической поверхности фильтра). Фильтр подбирается в соответствии с размером просвета под «мостом»	Полускальные неустойчивые породы, гравийно-галечниковые отложения, крупнозернистые пески с наименьшим преобладающим размером частиц до 1,0 мм

2. Штампованные с козырьками	Просечной лист с крупными (5—12 мм) отверстиями, прикрытыми козырьками, с антикоррозийным покрытием или из нержавеющей стали толщиной 4—8 мм	Скважность каркаса до 40 %. Фильтр подбирается в соответствии с размером проходного отверстия под козырьками	Полускальные, неустойчивые породы, гравийно-галечниковые отложения с преобладающей крупностью частиц 1—10 мм
3. С ребристой водоприемной поверхностью	Фильтровые элементы из колец или сегментов из пластмасс или прессованных материалов. Стержни ∅ 10—14 мм из простой стали или из стеклопластика	Скважность каркаса до 20—25 %. Ребристость в большинстве случаев продольная. Шаг ребер подбирается в зависимости от состава каптируемых пород	Крупнозернистые, среднезернистые и мелкозернистые пески. Подземные воды характеризуются коррозионными свойствами
Гравитационные фильтры			
Фильтр-каркас гравитационно-щелевого типа	Кольцевые элементы из пластмасс (стеклопластика, волокнита, древесной пресс-крошки с аминопластом, декоррозита, полиэтилена и т. д.). Стержни, стяжные болты диаметром 10—18 мм из простой стали	Скважность каркасов по наружному диаметру 50—70 %, по внутреннему диаметру 15—25 %. Размер отверстий регулируется специальными вкладышами, установленными между кольцевыми элементами	Пески различного гранулометрического состава. Подземные воды характеризуются коррозионными свойствами
Гравийные фильтры, создаваемые на забое			
Гравийные засыпные (на забое)	В соответствии с выбранной конструкцией опорного каркаса по разделам 1, 2 и 3	Опорный каркас — все конструкции фильтров 1, 2 и 3 типов. Размеры отверстий каркасов подбираются в соответствии с размерами обсыпки. Водоприемным элементом является гравийная обсыпка. Число слоев обсыпки и ее крупность определяются составом водоносных песков	Пески различного гранулометрического состава. При сложном переслаивании песков различной зернистости. При каптаже вод неустойчивого химического состава, вызывающих кольматаж фильтров

В связи с региональным снижением напоров подземных вод в сельскохозяйственном водоснабжении ряда областей страны приходится ориентироваться на каптаж водоносных пластов, залегающих на глубинах 200 м и более. Диапазон конструкций фильтров, применяемых до настоящего времени при оборудовании водоносных песков на этих глубинах, невелик. Это, как правило, фильтры на трубчатом каркасе с водоприемной поверхностью из сеток галунного плетения, реже используется проходка скважин с уширенным забоем и последующим устройством гравийных фильтров путем засыпки гравия или в кожуховой модификации. Однако устройство гравийного фильтра в скважине с уширением весьма трудоемко, при установке кожуховых фильтров существенно увеличивается диаметр бурения, что часто оказывается неэкономичным, а при установке сетчатых фильтров производительность скважин не удовлетворяет заявленным потребностям, и гидравлические потери на скважине существенно превышают пластовые.

В таких условиях можно применять конструкции фильтров, в которых искусственно создается аналог пористой среды путем многослойной проволочной обмотки, коаксиальной установки фильтровых труб и перекрестной намотки стекложгута в стеклопластиковых фильтрах. Это многослойные проволочные фильтры по патенту США — новая модификация кожухового фильтра со смещенной перфорацией кожуха и каркаса — и стеклопластиковые фильтры.

Многослойный проволочный фильтр изготовляют с помощью многократной проволочной обмотки перфорированной трубы. Наружный слой проволоки имеет такие зазоры, которые удерживают только крупные частицы песка. Расстояние между проволоками внешнего слоя задается близким к диаметру зерен, соответствующему 95 %-ному содержанию в пробе по кривой зернового состава. Шаг обмотки среднего слоя принимается меньше наружного и вместе с тем больше диаметра зерен, соответствующего 75 %-ному содержанию частиц в пробе песков. Внутренний слой (в частном случае он может отсутствовать) имеет еще меньший зазор (меньше размера зерен, соответствующего 50 %-ному содержанию в пробе). При такой конструкции фильтра крупные частицы песка задерживаются на наружном слое проволочной обмотки, имеющем максимальные зазоры. На каждом последующем слое водоприемной поверхности отсеиваются все более мелкие частицы песка.

Опытные исследования в лабораторных условиях показали, что в рассматриваемой модификации сопротивления фильтров незначительно превышают сопротивления конструкций с рыхлой гравийной обсыпкой. Полевые исследования фильтров на нефтяных и газовых скважинах показали, что удовлетворительно эти конструкции фильтров работают при коэффициенте неоднородности каптируемых песков, большем 2. В этом случае при относительно небольших гидравлических потерях пескования скважин не наблюдалось.

В отечественной практике многослойные проволочные конструкции опробовали в Азово-Кубанском артезианском бассейне, однако в скважинах устанавливали фильтры с наружным слоем обмотки с наименьшим зазором. Лабораторные исследования этих фильтров в контакте с люберецким песком, имеющим коэффициент фильтрации 10—12 м/сут, показали, что проницаемость собственно тела фильтра, по данным привязного пьезометра, несколько выше проницаемости песков (20—25 м/сут), а с учетом контактных гидравлических потерь проницаемость фильтра составляет 5—8 м/сут при среднем значении показателя обобщенного сопротивления, равном 0,42.

Опыт массового применения этих конструкций при оборудовании скважин на воду в Азово-Кубанском артезианском бассейне при установке фильтров на глубину более 100 м показал, что в общем случае пескования скважин не наблюдалось. Однако дополнительные сопротивления в призабойной зоне оставались значительными, т. е. многослойные проволочные фильтры в варианте Краснодарской комплексной геологической экспедиции не имеют каких-либо преимуществ, использовать такого рода фильтры можно только в том случае, когда размер отверстий наружной обмотки больше размера отверстий внутреннего контура.

Сохранение минимального диаметра бурения и фильтра при оборудовании скважин на воду при довольно надежном предотвращении пескования обеспечивается в случае использования фильтра из двух коаксиальных труб, перфорация которых выполнена по винтовым линиям с равным по величине шагом. При этом перфорация на одной трубе смещена в осевом направлении относительно другой, а шаг винтовой линии равен удвоенной сумме ширины перфорации и ее смещения. Ширина же перфорации равна толщине межтрубного пространства. Кольцевое пространство между трубами заполнено фильтрующим материалом. Предотвращение суффозии достигается благодаря тому, что путь фильтрации жидкости удлиняется вследствие смещения ступеней перфорации.

Для мелкозернистых и пылеватых водоносных песков оптимальная величина сдвига ступеней составляет 100—150 мм, а ширина перфорации и толщина межтрубного зазора — 40—50 мм. При этом шаг винтовой линии равен 280—400 мм. Стеклопластиковые фильтры получают перекрестной намоткой стекложгута различного диаметра с последующей пропиткой его эпоксидной смолой. В общем случае применение указанных конструкций фильтров при оборудовании скважин на глубоко залегающие горизонты достаточно обоснованно.

4.3. Подбор и расчет фильтров

В основу подбора и расчета фильтров водозаборных скважин должны быть положены следующие критерии: обеспечение необходимой механической прочности при установке фильтров в сква-

жину, коррозионной устойчивости в расчетный срок эксплуатации, минимальных потерь напора при сохранении суффозионной устойчивости пород в прифильтровой зоне, поддержания стабильной работы скважин в течение всего периода предполагаемой их эксплуатации как за счет надежного конструирования фильтров и скважин, так и обеспечения возможности применения в эксплуатационных скважинах комплекса мер по восстановлению их производительности.

Прочностные характеристики фильтров, учитывающие растяжение и сжатие фильтровой колонны в направлении оси скважины под действием собственного веса при установке фильтра и труб, боковое давление пород и гравийной обсыпки, а также фильтрационное давление при притоке воды в скважину, вызывающее радиальные силы сжатия, указываются в соответствующих технических условиях заводов-изготовителей или ГОСТах на выпускаемую серию конструкций с приведением обобщенного критерия — предельной глубины скважины, до которой допускается установка данных фильтров (например, соответствующие технические условия Дрогобычского завода Мингазпрома СССР).

Несущие свойства фильтровой колонны, а следовательно, и сроки эксплуатации скважины изменяются в зависимости от коррозионных свойств отбираемой воды и коррозионной устойчивости фильтра. Химическая коррозия происходит, если в воде находятся некоторые компоненты в концентрациях, обусловливающих растворение металлов. Такими компонентами являются CO_2, O_2, H_2S, HCl, H_2SO_4. При каптаже вод питьевого качества с небольшой минерализацией возможность коррозии из-за нарушения углекислотного равновесия следует прогнозировать, используя показатель Ризнера.

Фильтры из низкоуглеродистой стали без антикоррозийных покрытий применимы при $Ri=7—8$, при наличии в конструкции латунных материалов следует иметь в виду, что оптимальная область их применения соответствует $Ri=6,5—8,5$, нержавеющая сталь характеризуется максимальной устойчивостью и применима даже при $Ri=12—15$.

При каптаже скважинами подземных вод, содержащих сероводород, скорость коррозии стальных труб может достигать значительных величин — 8—10 мм в год, поэтому в этих случаях обязательно применение антикоррозионных конструкций. Процесс электрохимической коррозии следует предотвращать, используя в конструкции фильтров металлы с близкими потенциалами. Следует отметить, что свойства подземных вод, в том числе и коррозионные, могут изменяться в процессе эксплуатации скважин, и это обстоятельство необходимо учитывать при их проектировании в зависимости от предполагаемых закономерностей формирования химического состава отбираемых вод в ходе эксплуатации водозаборов. Так, при нахождении в области влияния скважины заболоченных участков вполне вероятно существенное увеличение в про-

цессе эксплуатации в отбираемой воде содержания сероводорода и железа.

При выборе типа фильтра скважины с высокой расчетной производительностью (более 150 м³/ч) следует применять конструкции большой скважности со щелями, ориентированными в горизонтальной плоскости (каркасно-стержневые с проволочной обмоткой, фильтры конструкции МГМИ). При проектной производительности скважин 100—150 м³/ч наряду с каркасно-стержневыми конструкциями допустимо использование фильтров из штампованных материалов и на трубчатых каркасах с водоприемной поверхностью из проволоки или штампованного листа. При производительности скважин 50—100 м³/ч в скважинах допускается установка фильтров с сеткой квадратного плетения. При проектном дебите скважин менее 50 м³/ч возможно применение фильтров с сетчатой водоприемной поверхностью и конструкций блочного типа.

При сооружении эксплуатационных скважин длительного действия необходимо предусматривать установку фильтров максимальной скважности. Следует иметь в виду, что предельная скважность для каркасно-стержневых фильтров с проволочной обмоткой составляет 40—50 %, для щелевых и дырчатых фильтров максимальная скважность составляет 20—25 %. Использование дополнительной водоприемной поверхности приводит к снижению действующей скважности конструкции. Поэтому предпочтительнее оборудовать скважины фильтрами-каркасами с соответствующей гравийной обсыпкой.

При выборе фильтров применительно к каптируемым типам водоносных пород можно руководствоваться результатами сравнительной оценки их водопроницаемости, приведенными на рис. 4.2. При этом следует учитывать, что проницаемость фильтра должна быть не менее или в 10 раз больше коэффициента фильтрации водоносных пород.

Диаметр фильтра-каркаса выбирают исходя из проектного дебита скважины и параметров водоподъемного оборудования. Следует учитывать, что скорость движения воды в водоподъемных трубах не должна превышать 1,5—2 м/с. Рациональное соотношение диаметра фильтра $d_ф$ и диаметра скважины $d_с$ записывается в виде: $d_с = (4—5)\,d_ф$, т. е. толщина слоя гравийной обсыпки должна составлять $(1{,}5—2)\,d_ф$.

Длину фильтра-каркаса находят на основе анализа гидрогеологических условий водоносных пластов, принимая ее равной их мощности, если последняя меньше 10 м. В этом случае проектируют скважины, совершенные по степени вскрытия пласта. При значительных мощностях пласта фильтры устанавливают в наиболее водопроницаемых зонах. При слоистом строении водоносной толщи возможна установка ярусных фильтров с перекрытием водонепроницаемых или слабопроницаемых отложений глухими трубами.

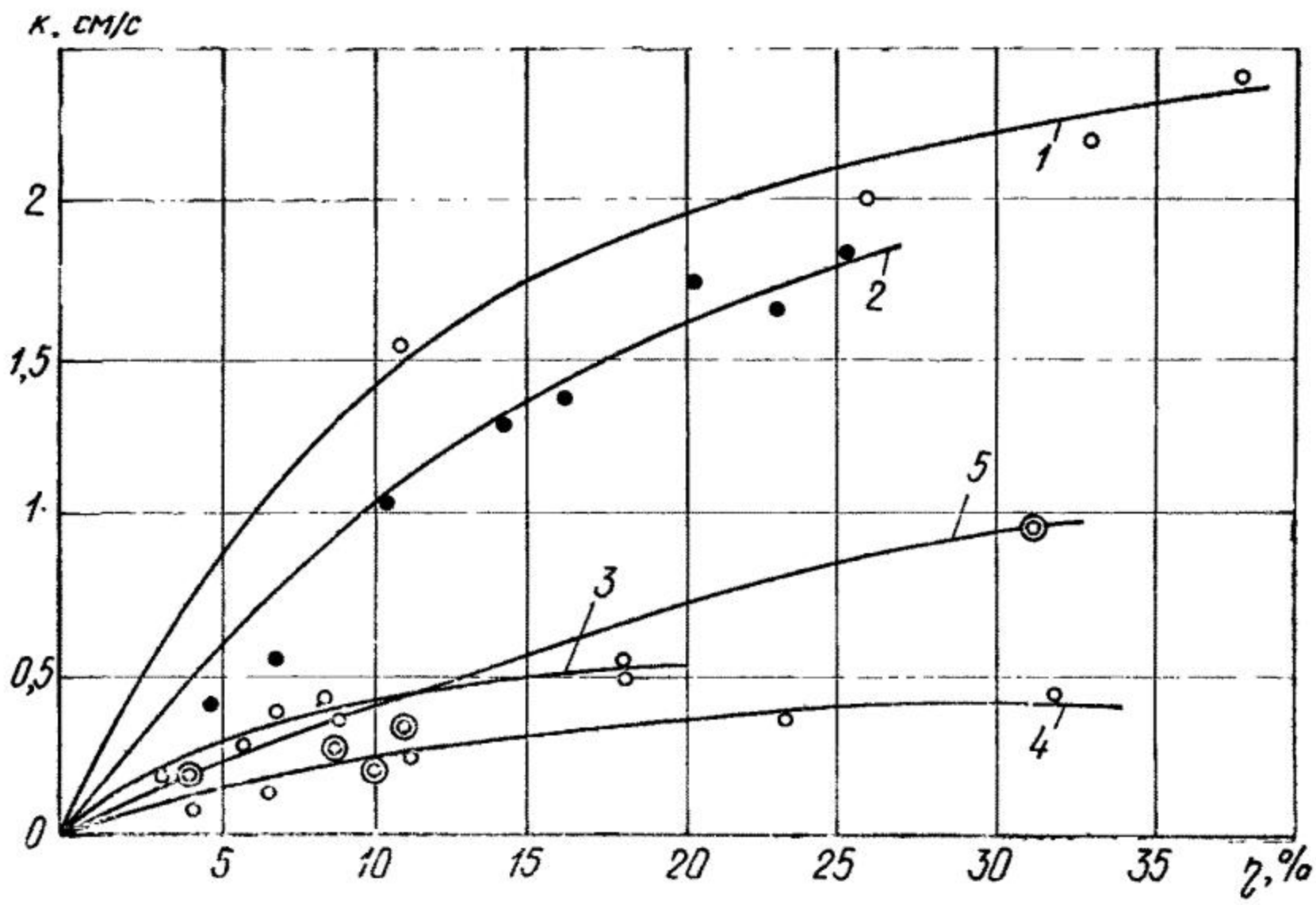


Рис. 4.2. Проницаемость фильтров различных типов в зависимости от скважности
1 — каркасно-стержневые; *2* — проволочные на трубчатом каркасе; *3* — с водоприемной поверхностью из штампованного листа; *4* — сетчатые фильтры с сетками галунного плетения; *5* — стеклопластиковые фильтры

В однородном водоносном горизонте мощностью 10—15 м наиболее рационально соотношение $l/m=0{,}8—0{,}9$ (l — длина фильтра, m — мощность водоносного пласта), в пласте мощностью 10—15 м это соотношение следует принимать не более 0,7—0,8. В более мощных водоносных горизонтах для окончательного выбора длины фильтра при заданном диаметре конструкции целесообразно использовать проверку постоянства гидравлических потерь с применением критерия, согласно которому при $l>0{,}53d_ф/\mu\eta$ гидравлические потери и приток к скважине остаются постоянными (здесь l — длина фильтра, μ — коэффициент расхода, η — скважность фильтра).

Величину μ можно принять, использовав данные рис. 4.3 или табл. 4.4.

Значение η оценивается как отношение площади отверстий фильтра к общей площади его боковой поверхности. При наличии дополнительной водоприемной поверхности расчетное значение $\eta=\eta_1\eta_2$, где η_1 — скважность каркаса и η_2 — скважность водоприемной поверхности, например сетчатой.

Размер проходных отверстий фильтра назначают с учетом зернового состава пород, слагающих водоносный горизонт, и соответствующего размера частиц гравийной обсыпки. Для подбора размера отверстий фильтров рекомендуются эмпирические соотношения (по С. К. Абрамову), представленные в табл. 4.5.

Рис. 4.3. Зависимость коэффициента расхода фильтров от размера контактирующих частиц (d_{25} — размер частиц песка, соответствующий 25%-ному содержанию в пробе; b — диаметр отверстия)

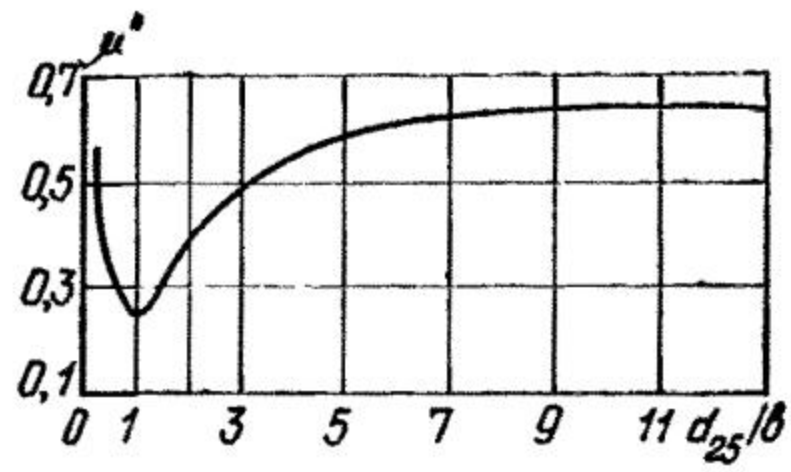


Таблица 4.4. Коэффициент расхода фильтра с учетом наложения гравия

Тип фильтра	Скважность фильтра, %	Средний диаметр гравия, D_{50}, мм								
		20	16	12	10	8	6	4	2	1,4
Штампованный со щелями типа «мост»	3,5	0,82	0,81	0,78	0,75	0,69	0,60	0,48	0,32	0,26
	7,2	0,64	0,62	0,57	0,53	0,48	0,40	0,30	—	—
	11,2	0,56	0,52	0,46	0,41	0,36	0,30	—	—	—
	14,6	0,53	0,48	0,42	0,37	0,32	0,27	—	—	—
Проволочный	18,2	0,51	0,51	0,51	0,50	0,48	0,46	0,41	0,34	0,32
	30,8	0,34	0,34	0,34	0,33	0,32	0,30	0,27	0,23	0,19
Щелевой с выступающими кромками	4,8	0,88	0,84	0,79	0,75	0,68	0,57	—	—	—
Дырчатый с сеткой на поверхности	14,8	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,62	0,48	0,40

Таблица 4.5. Размеры отверстий фильтров в зависимости от коэффициента неоднородности пород и их среднего диаметра

Тип фильтра	Рекомендуемые размеры отверстий фильтров в породах	
	однородных и обсыпках, $k_н<2$	в неоднородных и обсыпках, $k_н>2$
Дырчатый	$(2,5—3)d_{50}$	$(3—4)d_{50}$
Сетчатый	$(1,5—2)d_{50}$	$(2—2,5)d_{50}$
Щелевой	$(1,25—1,5)d_{50}$	$(1,5—2)d_{50}$
Проволочный	$1,25d_{50}$	$1,5d_{50}$

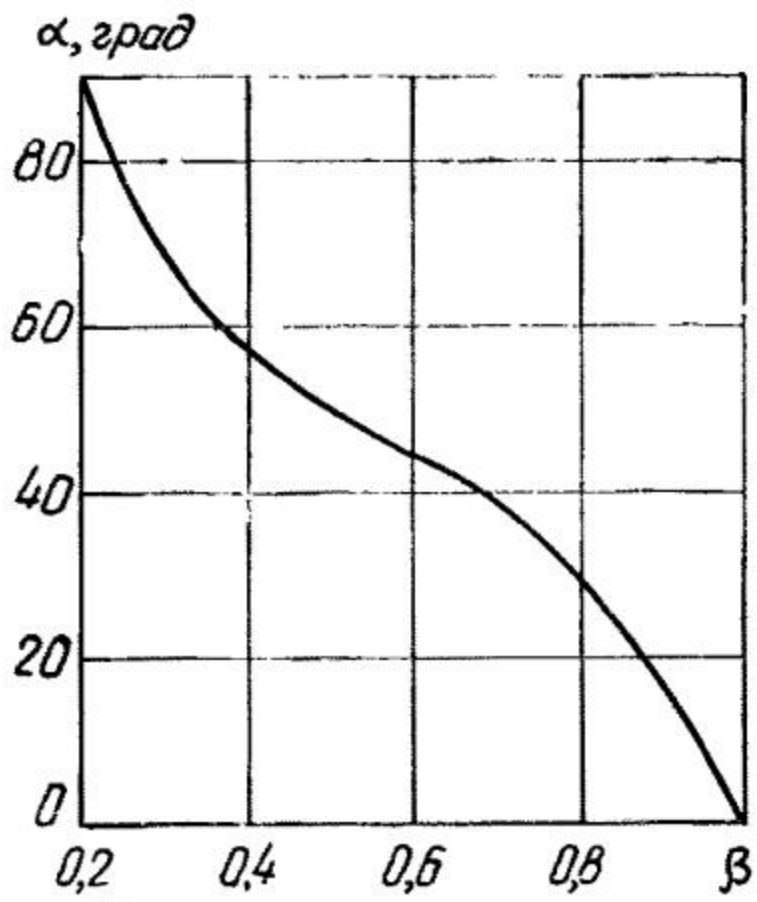


Рис. 4.4. График к подбору фильтров гравитационного типа

В галечниках, гравии и крупнозернистых песках устанавливают фильтры-каркасы обычно без дополнительной водоприемной поверхности и без гравийной обсыпки. В среднезернистых, мелкозернистых и тонкозернистых песках для увеличения отбора воды из скважин и продления срока их эффективного действия рекомендуется устанавливать фильтры с гравийной обсыпкой. Гравийная обсыпка, кроме того, служит важным конструктивным элементом, позволяющим задаваться большим размером проходных отверстий фильтра и большей скважностью. Гравийные фильтры обычно устраивают из одного или двух слоев обсыпки (реже с бо́льшим числом слоев).

Фильтры блочного типа подбирают при известной водопроницаемости песков водоносного горизонта k. Коэффициент фильтрации блоков соответственно оценивают по формуле $k_ф^0 \approx 100k$. При расчете фильтров гравитационного типа допустимые скорости фильтрации воды через водоприемные отверстия оценивают по формуле $v_{доп} \approx 0{,}6\beta_k$, где k — коэффициент фильтрации породы или гравийной обсыпки; β — коэффициент, зависящий от угла внутреннего трения грунта и определяемый по графику на рис. 4.4.

Производительность скважин с фильтрами гравитационного типа можно существенно увеличить, если обсыпку фильтров выполнять из крупнозернистого материала (гравия). Крупность гравийного материала в этом случае подбирают согласно рекомендациям для подбора фильтров с гравийной обсыпкой.

4.4. Подбор фильтрующих обсыпок для водозаборных скважин

Для обсыпки водозаборных скважин следует использовать несуффозионные гравийные материалы с коэффициентом неоднородности менее 3—5, состоящие из хорошо окатанных нерастворимых в воде пород.

При подборе состава обсыпок вначале следует оценить суффозионную устойчивость пород по методу В. Н. Кондратьева. Для этого строят дифференциальную кривую зернового состава породы, характеризующую распределение по размерам отдельных фракций. Если кривая имеет разрывы или значительные прогибы в содержании отдельных фракций, то это указывает на возможность механической суффозии в породе. В противном же случае породу следует считать несуффозионной.

Чтобы определить, как будет развиваться суффозия в породе, следует разделить ее состав на скелет и заполнитель по точкам разрыва или прогиба дифференциальной кривой. Далее следует построить интегральные кривые зернового состава скелета и заполнителя и рассчитать гидравлический эквивалент пор скелета по формуле

$$D_0^{ск} = 0{,}23\sqrt{a}\,[m/(1-m)]^{3,2}\sqrt{\eta^*}\,D_{17}, \qquad (4.1)$$

где a — эмпирический коэффициент, равный 3,42; m — пористость скелета породы; η^* — коэффициент неоднородности скелета породы; D_{17} — диаметр частиц, соответствующий 17 %-му содержанию.

Условие, достаточное для возникновения суффозии в породе, с учетом полученных данных определится неравенством

$$D_0^{ск}/d_{50}^{зап} > \xi, \qquad (4.2)$$

где $d^{зап}_{50}$ — средний диаметр частиц заполнителя; ξ — структурный коэффициент, определяемый по графику (см. рис. 4.7 и 4.8), при $d_{св} = d^{зап}_{50}$.

При меньших значениях отношения суффозия в породе будет местная на контакте с гравийной обсыпкой и вглубь распространяться не будет.

Для оценки деформации породы следует сопоставить возможную пористость скелета (рис. 4.5) с расчетной по формуле

$$m_{ск} = 1 - (\delta n_{ск}/\gamma), \qquad (4.3)$$

где δ — объемный вес породы; $n_{ск}$ — относительное весовое содержание скелета в породе; γ — удельный вес скелета.

Если расчетная пористость скелета больше возможной, то при развитии суффозии возможны осадки породы.

Рассмотрим способы подбора параметров обсыпок отдельно для несуффозионных и суффозионных пород.

Подбор параметров обсыпок для несуффозионных пород. При подборе параметров обсыпок для несуффозионных пород сначала следует с помощью графика (рис. 4.6) и интегральной кривой состава породы определить размер сводообразующих частиц, а затем, используя графики (рис. 4.7 и 4.8), рассчитать допустимый межслойный коэффициент

$$\xi = a'\,(D_0/d_{св}), \qquad (4.4)$$

где a' — поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность раскладки частиц гравийной обсыпки ($a' = 1{,}03 - 1{,}1$).

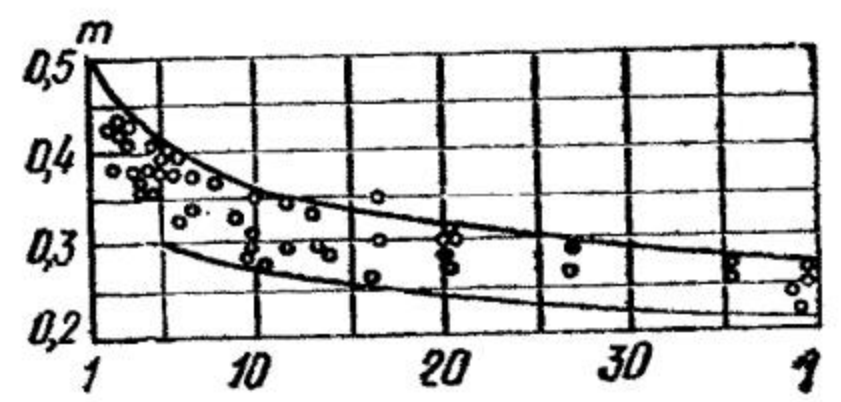


Рис. 4.5. Зависимость пористости породы от η

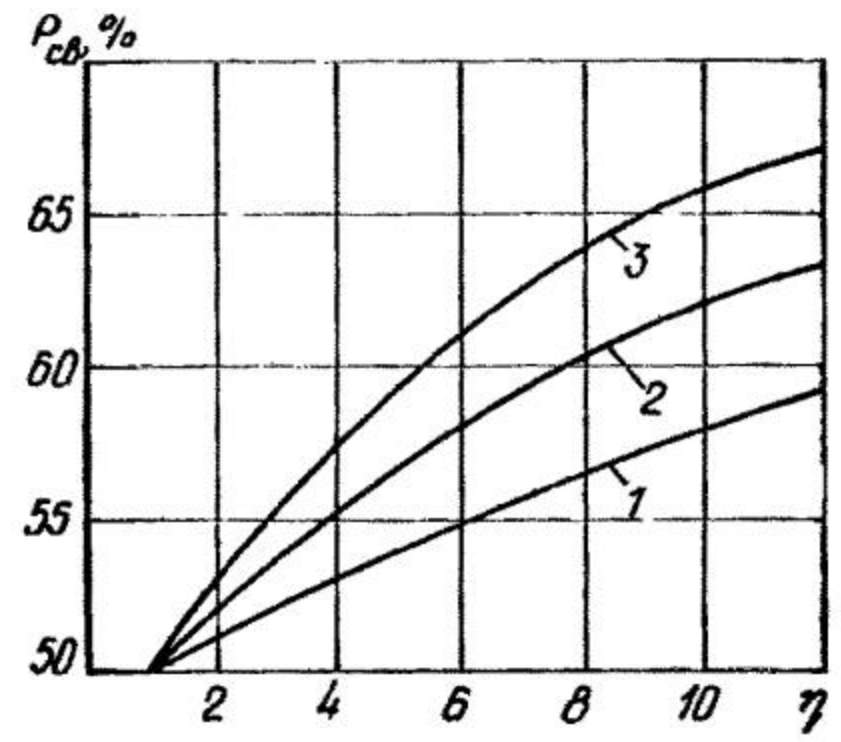


Рис. 4.6. Зависимость процентного содержания сводообразующих частиц от неоднородности породы

1 — тонкозернистый песок; *2* — мелкозернистый; *3* — среднезернистый и крупнозернистый песок

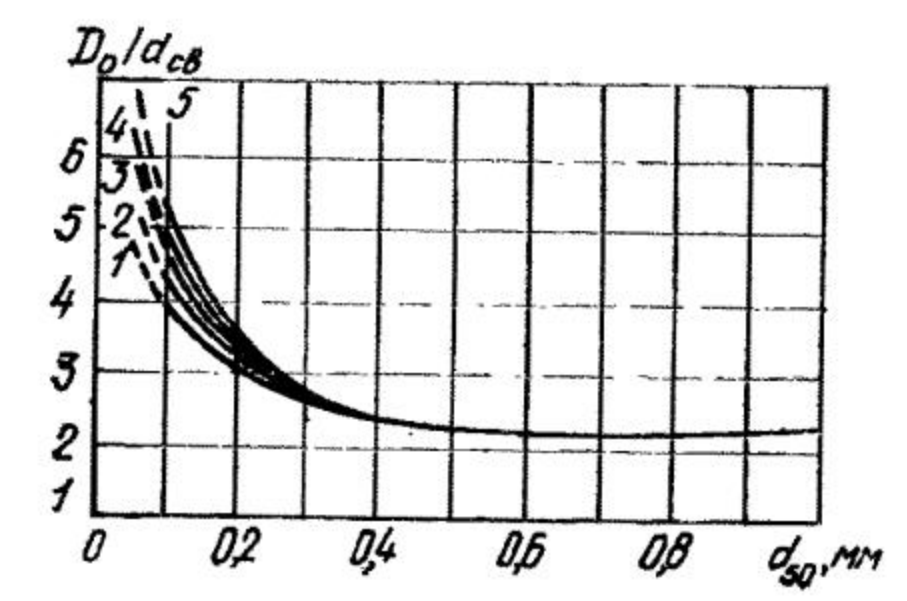


Рис. 4.7. Кривые зависимости допустимых межслойных коэффициентов от неоднородности породы

1 — η=1; *2* — η=2; *3* — η=3; *4* — η=5; *5* — η=10

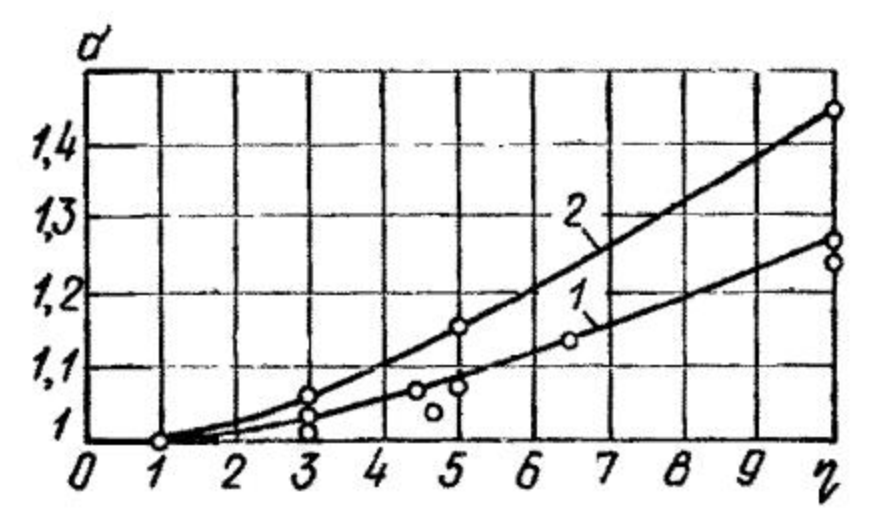


Рис. 4.8. Кривые зависимости поправочных коэффициентов для неоднородных обсыпок от η

1 — обсыпка толщиной 10—20 см; *2* — то же, 5 см

Из зависимости (4.4) получим

$$D_0 = \xi d_{ск}/a'. \qquad (4.5)$$

Затем, учитывая равенство (4.5), следует определить D_{17} обсыпки

$$D_{17} = D_0/0{,}23\sqrt{a'}\,[m/(1-m)]^{3,2}\sqrt{\eta^*}. \qquad (4.6)$$

При известном D_{17}, задавшись коэффициентом неоднородности породы, можно рассчитать весь состав гравийной обсыпки с использованием графика несуффозионных пород (рис. 4.9). Рассчитанная указанным выше способом обсыпка соответствует максимально допустимой крупности. Для определения минимально допустимой крупности обсыпки используют равенство:

$$D_{50}/d_{50} = 7 \ldots 9. \qquad (4.7)$$

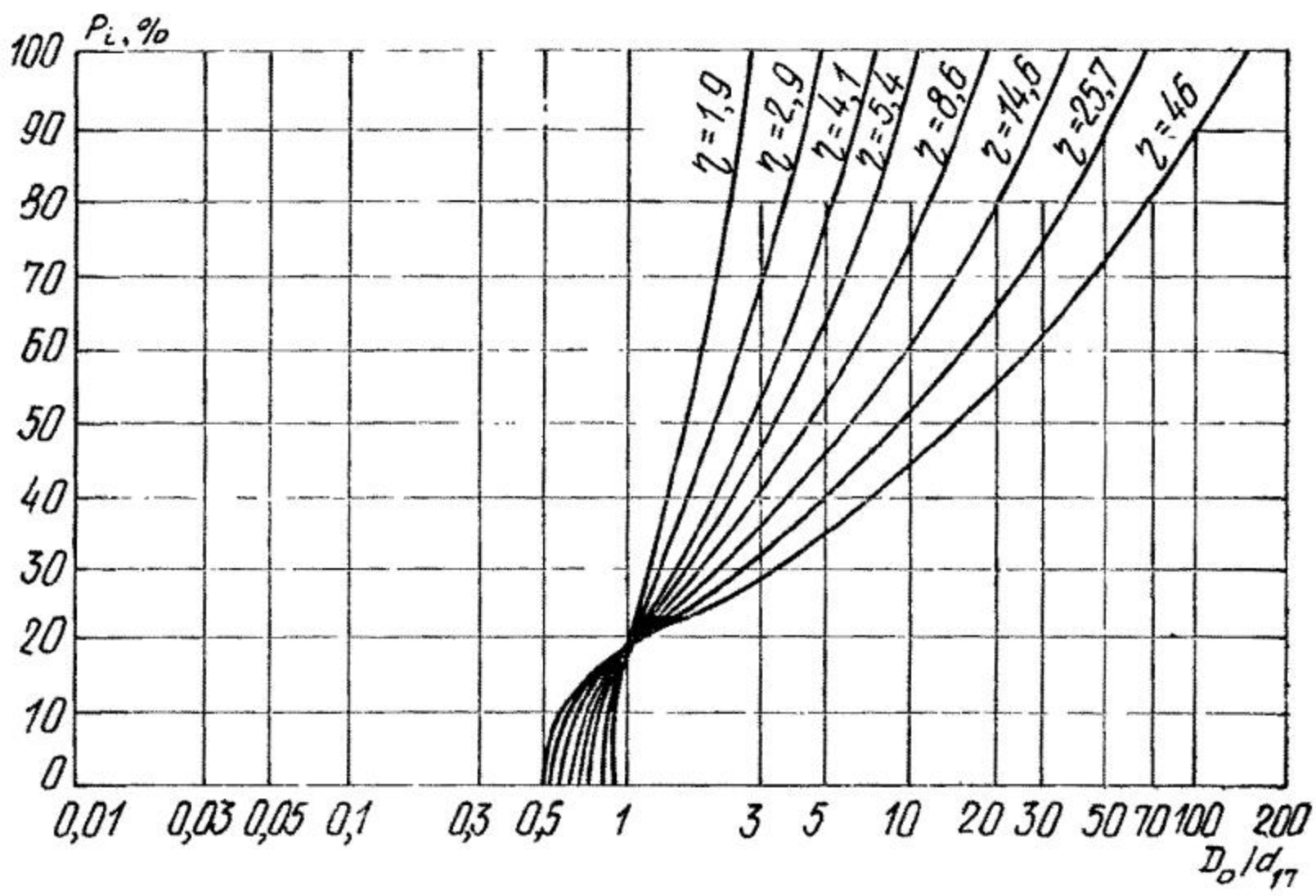


Рис. 4.9. Кривые зернового состава теоретически несуффозионных пород (по А. Н. Патрашеву)

Пример. Водоносный пласт сложен мелкозернистыми песками $d_{50}=0{,}2$ мм и $\eta^*=3$. Зерновой состав песков представлен на графике (рис. 4.10). Коэффициент фильтрации пласта $k=10$ м/сут. Намечается устройство скважины, оборудованной гравийным фильтром, с толщиной обсыпки 20 см.

Необходимо подобрать состав гравийной обсыпки с коэффициентом неоднородности, равным 3, и пористостью $m=40$ %. Построим дифференциальную кривую зернового состава породы (см. рис. 4.10). Как видно из рис. 4.10, эта кривая характеризуется равномерным содержанием отдельных фракций, отсутствием разрывов и резких прогибов, что служит признаком несуффозионной породы.

Далее определим по графику (см. рис. 4.6) процентное содержание сводообразующих частиц и с помощью интегральной кривой породы их размер ($d_{св}=0{,}021$ см). Затем с помощью графиков (см. рис. 4.7, 4.8) рассчитаем допустимый межслойный коэффициент $\xi=3{,}6$ и определим поправочный коэффициент $a'=1{,}03$, после чего по зависимости (4.5) найдем диаметр пор обсыпки

$$D_0 = 3{,}6 \cdot 0{,}021 / 1{,}03 = 0{,}0734 \text{ см}.$$

Далее по формуле (4.6) определим D_{17} обсыпки

$$D_{17} = 0{,}0734 / 0{,}23 \sqrt{3{,}42} \frac{0{,}4}{1-0{,}4} \sqrt[3{,}2]{3} = 0{,}179 \text{ см}.$$

Состав гравийной обсыпки рассчитываем по графику (см. рис. 4.9). Результаты приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6. Состав гравийной обсыпки

Средний диаметр D_{50}, мм	Коэффициент неоднородности	Содержание, %, фракций, мм				
		1—2	2—3	3—5	5—7	7—10
3,9	3	21	17	24	26	12

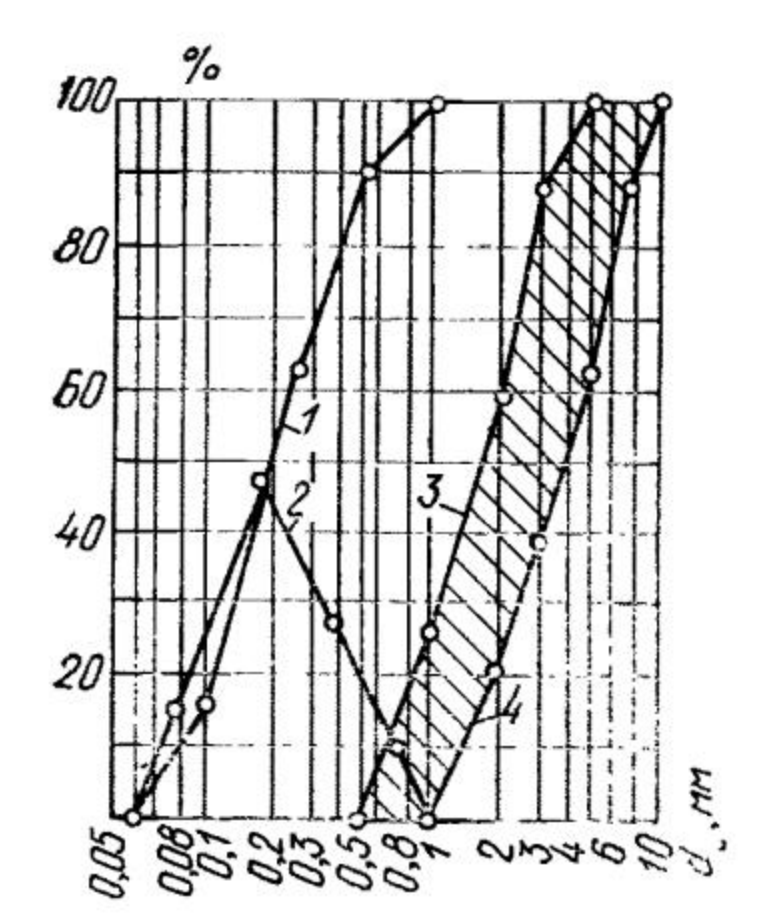


Рис. 4.10. Кривые зернового состава песчаной водоносной породы и рекомендуемых гравийных обсыпок

1 — интегральная кривая породы; *2* — дифференциальная кривая породы; *3* — интегральная кривая минимально допустимой по крупности обсыпки; *4* — интегральная кривая максимально допустимой по крупности обсыпки

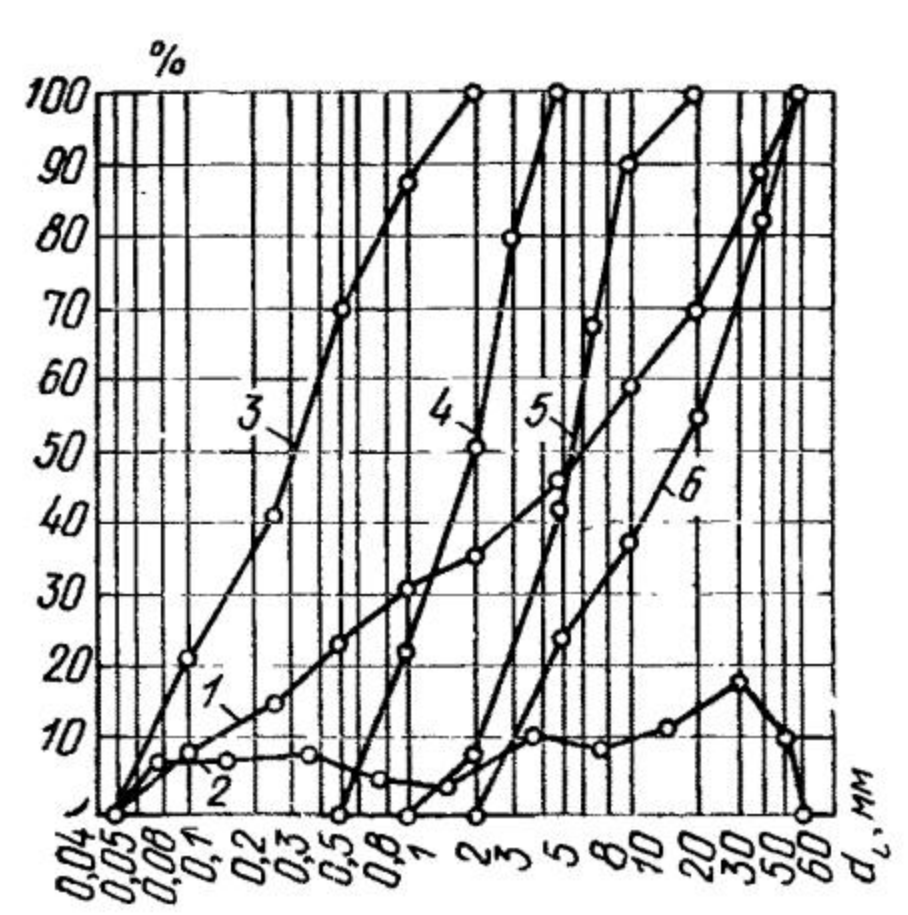


Рис. 4.11. Кривые зернового состава гравийно-галечниковой водоносной породы и рекомендуемых гравийных обсыпок

1 — интегральная кривая породы; *2* — дифференциальная кривая породы; *3* — интегральная кривая заполнителя; *4* — интегральная кривая минимально допустимой по крупности обсыпки; *5* — то же, максимально допустимой по крупности обсыпки; *6* — то же, скелета

Для определения минимально допустимой по крупности обсыпки вначале из равенства (4.7) следует определить $D_{50}=8\cdot0{,}02=0{,}16$ см, а затем на графике (см. рис. 4.10) через точку $D_{50}=1{,}6$ мм провести линию, параллельную кривой *1*.

Подбор параметров обсыпок для суффозионных пород. Параметры обсыпок для пород, в которых может развиваться опасная для их устойчивости суффозия, следует подбирать по составу заполнителя. Однако в этом случае при выборе состава сводообразующих частиц приближенно принимается $d_{св}=d_{50}^{зап}$.

В дальнейшем допустимый межслойный коэффициент выбирают так же, как и для несуффозионных пород, используя графики рис. 4.6, 4.7 по формуле

$$\xi = a'\,(D_0/d_{50}^{зап}). \qquad (4.8)$$

Если порода подвержена суффозии и при этом расчетная пористость ее скелета меньше фактически возможной, то применять обсыпку для предотвращения суффозии не имеет смысла. Если крупность обсыпки будет больше крупности скелета породы, то она не защитит ее от суффозии, а, наоборот, будет интенсивно кольматироваться.

Пример. Водоносный пласт состоит из гравийно-галечниковых отложений с $d_{50}=6$ мм; $\eta^*=69{,}9$; $\gamma=2{,}7$ г/см³ и $\delta=1{,}94$ г/см³.

Зерновой состав породы представлен на рис. 4.11. Намечается устройство скважины с гравийным фильтром толщиной 20 см. Необходимо подобрать состав гравийной обсыпки с коэффициентом неоднородности $\eta^*=3$ и пористостью $m=40$ %.

Вначале строим дифференциальную кривую породы (рис. 4.11), которая характеризуется прогибом в содержании фракций более 1 и менее 2 мм. Следовательно, в породе может быть суффозия.

Для выяснения характера суффозии породу по месту прогиба дифференциальной кривой разделим на скелет и заполнитель и рассчитаем их фракционный состав (см. рис. 4.11). Средний размер частиц заполнителя $d^{зап}_{50}=0{,}32$ мм, скелета $D_{50}=17$ мм, а весовое содержание скелета в породе 66 %.

Далее по формуле (4.3) определим пористость скелета

$$m_{ск}=1-(1{,}94\cdot 0{,}66/2{,}7)=0{,}53.$$

Затем по формуле (4.1) рассчитаем диаметр пор скелета при максимально возможной пористости

$$D_0^{ск}=0{,}23\cdot 342\,[0{,}37/(1-0{,}37)]\sqrt[3,2]{8{,}2}\cdot 0{,}37=1{,}86\text{ мм}$$

Определим отношение

$$D_0^{ск}/d_{50}^{зап}=1{,}86/0{,}32=5{,}8.$$

Согласно рис. 4.7, допустимое отношение $\xi=2{,}9$, т. е. $D_0^{ск}=5{,}8>2{,}9$, поэтому порода будет суффозионной.

Так как фактически возможная пористость скелета породы (см. рис. 4.5) равна 37 %, то при выносе частиц заполнителя произойдет разрушение породы. Для предотвращения опасной для устойчивости породы суффозии состав обсыпки должен удовлетворять допустимому межслойному коэффициенту, определяемому зависимостью (4.4) с помощью графиков на рис. 4.7 и 4.8: $D_0=0{,}091$ см.

Далее определим D_{17} обсыпки по зависимости (4.6)

$$D_{17}=0{,}091/0{,}23\sqrt{3{,}42}\cdot\frac{0{,}40}{1-0{,}40}\sqrt[3,2]{3}=0{,}23\text{ см}.$$

Затем рассчитаем фракционный состав несуффозионной гравийной обсыпки с помощью графика на рис. 4.9. Результаты расчетов сведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7. Состав несуффозионной гравийной обсыпки

Средний диаметр, мм	Коэффициент неоднородности	Содержание, %, фракций, мм					
		1—2	2—3	3—5	5—7	7—10	10—20
5,1	3	8	18	18	24	22	10

Состав минимально допустимой по крупности обсыпки находится таким же образом, как и для несуффозионных пород. Для этого вначале по зависимости (4.2) рассчитываем D_{50} обсыпки: $D_{50}=7\cdot 0{,}32=0{,}22$ см, а затем на графике 4.11 через точку $D_{50}=2{,}2$ мм мы проводим линию, параллельную кривой *5*.

В случае двухслойной обсыпки при подборе размера гравия внутреннего (опорного) слоя используют коэффициент межслойности, равный 5. Материал обсыпки должен быть однородным. Во

всех случаях количество частиц максимального и минимального диаметра в составе обсыпки не должно превышать 10 %.

Толщина слоя обсыпки в соответствии с приведенными выше критериями должна составлять (1,5—2)$d_ф$. Минимальную ее величину следует выбирать в зависимости от размера зерен гравия и песка:

размер зерен, мм	0,75—4	4—12	12—35
толщина слоя обсыпки, мм . . .	60	70	80

В скважинах с многослойной обсыпкой толщину слоя из тонкозернистого гравия (песка) никогда не следует принимать меньше толщины опорного слоя грунта. Применение для обсыпки фильтров гравия неоднородного состава нецелесообразно из-за существенного расслоения его в процессе засыпки и чередования слоев уплотненной обсыпки с крупнозернистыми слоями, через которые возможна суффозия. В исключительных случаях допустимо применять неоднородный гравий при принудительной подаче его на забой скважины по специально спускаемым трубам или путем других технологических приемов, обеспечивающих уменьшение расслоения гравия в ходе закачки.

Расход гравия для обсыпки фильтра определяется из соотношения

$$V = (\pi/4)\,(D_т^2 - d_ф^2)\,l\alpha, \qquad (4.9)$$

где $D_т$ — внутренний диаметр обсадной трубы; $d_ф$ — наружный диаметр фильтра; l — длина фильтра; $\alpha = 1{,}2 - 1{,}5$ — коэффициент, учитывающий растекание гравия под фрезер обсадной колонны и необходимый запас его над верхом фильтровой колонны.

ГЛАВА 5. НАСОСНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

5.1. Насосы и насосные станции для оборудования скважин

В зависимости от типа водозабора по условиям отбора воды выделяют насосное оборудование для забора воды из скважин, шахтных колодцев, лучевых и горизонтальных водозаборов и на каптажах источников.

Для подъема воды из скважин используют насосы с погружными электродвигателями типа ЭЦВ, с трансмиссионным валом, когда собственно насос находится в скважине, а электродвигатель — на поверхности земли (типа АТН и НА), и горизонтальные центробежные насосы, применяемые при высоком положении уровней подземных вод и малых понижениях уровня в ходе эксплуатации водозаборов.

Насосы типа ЭЦВ входят в состав оборудования скважин глубиной 10—300 м при изменении расходов скважин от 4 до

375 м³/ч. При этом минерализация подаваемой воды не должна превышать 1500 мг/л при кратковременном содержании не более 100 мг/л твердых механических примесей. Относительная коррозионная устойчивость насоса обеспечивается в тех случаях, когда концентрация хлоридов не превышает 550 мг/л, сульфатов — 500 мг/л и сероводорода — 1,5 мг/л.

Насосы типа ЭЦВ одно- или многоступенчатые с вертикальным расположением вала работают с подпором от 1 до 6 м. Работа насоса без постоянного подпора, а также его установка в отстойники скважины не допускаются, так как при этом происходит сгорание обмотки двигателя. Насосы этого типа применимы в различных гидрогеологических условиях, но для эффективной их работы необходимо проведение комплексных расчетов с учетом взаимодействия скважин и гидравлических потерь в водоводах. Технические данные насосов для оборудования скважин приведены в таблице.

Технические данные насосов типа ЭЦВ, АТН и НА

Марка	Насос		Электродвигатель				Масса, кг	
	производительность, м³/ч	напор, м вод. ст.	марка	мощность, кВт	частота вращения, об/мин	напряжение, В	насоса	агрегата
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Насосы типа ЭЦВ								
ЭЦВ 4-2,5-65	2,5	65	1ПЭДВ-1-93	1,0	2840	380	33	—
1ЭЦВ 4-4-45	4	45	1ПЭДВ-1-93	1,0	2840	380	29	—
1ЭЦВ 4-4-70	4	70	1ПЭДВ-1,6-93	1,6	2840	380	33	—
1ЭЦВ 6-4-130 З/К	4	130	7ПЭДВ-2,8-140	2,8	2840	380	—	90
1ЭЦВ 6-4-190 З/К	4	190	9ПЭДВ-4,5-140	4,5	2840	380	—	100
3ЭЦВ 6-6,3-85	6,3	85	3ПЭДВ-2,8-140	2,8	2850	380	—	68
3ЭЦВ 6-6,3-85 З/К	6,3	85	7ПЭДВ-2,8-140	2,8	—	—	—	70
4ЭЦВ 6-6,3-125 З/К	6,3	126	9ПЭДВ-4,5-140	4,5	—	—	—	85
3ЭЦВ 6-6,3-125	6,3	125	4ПЭДВ-4,5-140	4,5	2850	380	—	75
1ЭЦВ 6-10-50 З/К	10	50	7ПЭДВ-2,8-140	2,8	2850	380	—	73
3ЭЦВ 6-10-80	10	80	3ПЭДВ-4,5-140	4,5	2840	380	—	72
1ЭЦВ 6-10-110 З/К	10	110	6ПЭДВ-5,5-140	5,5	—	380	—	90
1ЭЦВ 6-10-140 З/К	10	140	9ПЭДВ-8-140	8	—	380	—	120
1ЭЦВ 6-10-185 З/К	10	185	9ПЭДВ-8-140	8	—	380	—	132
ЭЦВ 6-10-235	10	235	6ПЭДВ-11-140	11	—	380	—	145
3ЭЦВ 6-16-50	16	50	3ПЭДВ-4,5-140	4,5	2840	380	—	78
ЭЦВ 6-16-75 ГУ5	16	75	ПЭДВ-5,5-140	5,5	2850	380	—	183,2
ЭЦВ 6-16-75	16	75	АПД-140-7/2	7	2850	380	105	178
3ЭЦВ 6-16-75	16	75	3ПЭДВ-5,5-140	5,5	2840	380	—	186
ЭЦВ 6-16-1107-У5	16	110	АПД-180-8-2	8	2850	—	145	201
1ЭЦВ 8-25-100 З/К	25	100	5ПЭДВ-11-180	11	—	—	—	145
ЭЦВ 8-25-100	25	100	АПД-180-8/2	8	2850	380	168	276
ЭЦВ 8-16-140-У5	16	140	ПЭДВ-11-180	11	—	380	—	150

Марка	Насос		Электродвигатель				Масса, кг	
	производительность, м³/ч	напор, м вод. ст.	марка	мощность, кВт	частота вращения, об/мин	напряжение, В	насоса	агрегата
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2ЭЦВ 8-25-100	25	100	ПЭДВ-11-180	11	2850	380	—	—
ЭЦВ 8-25-140ХГ	25	140	ПЭДВ-16-140-ХГ	16	—	—	—	195
2ЭЦВ 8-25-150 З/К	25	150	4ПЭДВ-16-180	16	—	380	—	200
1ЭЦВ 8-25-150 ХТрГ	25	150	3ПЭДВ-22-180 ХТрГ	22	—	380	—	315
ЭЦВ 8-25-300А	25	300	ПЭДВ-32-180	32	2900	380	—	390
ЭЦВ 8-40-60	40	60	ПЭДВ-11-180	11	2850	380	—	165
ЭЦВ 8-40-90	40	90	АПД-180-16/2	16	2850	380	242	367
ЭЦВ 8-40-180	40	180	ПЭДВ-32-180	32	2900	380	—	375
2ЭЦВ 10-63-65 З/К	63	65	2ПЭДВ-22-219	22	—	380	—	203
2ЭЦВ 10-63-110 З/К	63	110	2ПЭДВ-32-219	32	—	380	—	268
2ЭЦВ 10-63-150 З/К	63	150	2ПЭДВ-45-219	45	2920	380	—	322
1ЭЦВ 10-63-150	63	150	ПЭДВ-4,5-219	4,5	2920	380	—	340
1ЭЦВ 10-63-270	63	270	2ПЭДВ-65-219	65	—	—	—	470
ЭЦВ 10-120-60 У5	120	60	ПЭДВ-32-219	32	—	380	260	—
ЭЦВ 10-120-60	120	60	АПД-219-32/2	32	2920	380	355	565
ЭЦВ 10-160-35ГУ5	160	35	ПЭДВ-22-219Г	22	—	380	264	—
ЭЦВ 12-160-65	160	65	АПД-273-45/2	45	2920	380	400	673
1ЭЦВ 12-160-65 З/К	160	65	3ПЭДВ-45-270	45	—	380	—	385
1ЭЦВ 12-160-100 З/К	160	100	4ПЭДВ-65-270	65	—	380	—	420
1ЭЦВ 12-210-253 З/К	210	25	2ПЭДВ-22-219	22	—	380	—	225
2ЭЦВ 12-210-55	210	55	2ПЭДВ-45-270	45	2920	380	—	400
1ЭЦВ 12-210-145	210	145	5ПЭДВ-125-70	125	2940	380	—	800
2ЭЦВ 12-255-30ГУ5	255	30	2ПЭДВ-32-219Г	32	—	380	260	—
ЭЦВ 12-375-30Г	375	30	2ПЭДВ-45-219	45	—	—	—	270
ЭЦВ 14-210-300Х-У5	210	300	ПЭДВ-250-320 В5	250	—	3000	1818	—
ЭЦВ 16-375-175Х-У5	375	175	ПЭДВ-250-320 В5	250	—	3000	1702	—
1УЭЦП 16-3000-1000	3000	930	ПЭДВ-500-375 В5	500	—	6000	3173	—
УЭЦП 16-2000-1400	2000	1360	ПЭДВ-500-375-В5	500	—	6000	4325	—
Насосы типа АТН								
АТН-8-1-16	30	65	А02-61-4	13	1450	220/380	—	2178,7
АТН-8-1-22	30	90	А02-62-4	17	1450	220/380	—	2865,2
Насосы типа НА								
12НА-9×4	80	43	ВА0-62-4	17	1470	380/660	1080	1260
12НА-22×6	150	54	ВАО-72-4	40	1470	380/660	1231	1541

Горизонтальные центробежные насосы для забора воды из скважин используют редко и в тех случаях, когда динамический уровень подземных вод находится в пределах высоты всасывания

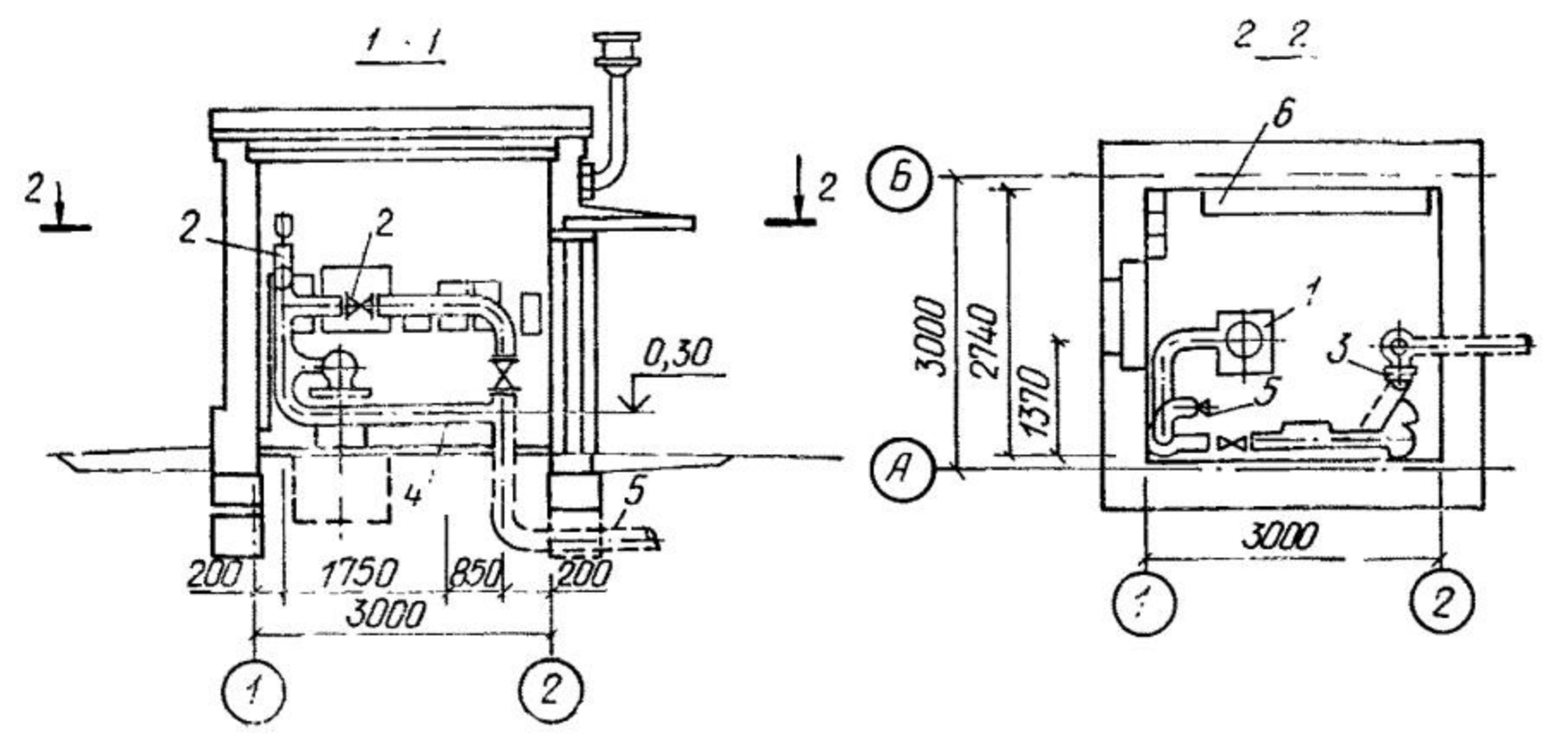


Рис. 5.1. Насосная станция над скважиной (наземная)

1 — оголовок скважины; *2* — напорный трубопровод с вантузом и задвижкой; *3* — обратный клапан; *4* — водомер; *5* — холостой сброс; *6* — станция управления и щиты электрооборудования

насосов (до 6 м) или при обеспечении работы насосов под заливом. В паспортных данных насоса гарантируется допустимая вакуумметрическая высота всасывания при определенной подаче и частоте вращения насоса, приведенным к нормальным условиям эксплуатации (температура воды 20° С и барометрическое давление 10 м вод. ст.). Как правило, горизонтальные центробежные насосы применяют на водозаборах, когда насосные станции расположены непосредственно у каптажной камеры или сборного резервуара на горизонтальных водозаборах. Характеристики горизонтальных центробежных насосов, выпускаемых в СССР, изменяются в широких пределах: производительность — от 2 до 12 500 м³/ч при напоре от 15 до 700 м.

Насосы устанавливают при условии их работы под заливом. Если это оказывается невозможным, в станции для запуска насосов предусматривают установку вакуум-насоса и вакуум-котлов.

Над устьями водозаборных скважин устраивают павильоны, в которых размещают оголовок, электродвигатель при установке насоса типа АТН и НА, горизонтальный центробежный насос, аппаратуру для отопления, пуска, измерения уровня воды в скважине, ее расхода, а также автоматизации и часть напорного трубопровода, на котором устанавливают задвижки, обратный клапан, вантуз, кран для отбора проб воды на анализ и трубопровод промывной воды с задвижкой, необходимой для сброса воды при пуске и промывке скважины. Павильоны над скважинами могут быть наземными или подземными (рис. 5.1, 5.2) и принимаются в основном по типовым проектам Союзгипроводхоза. При применении для откачки воды насосов с трансмиссионным валом проектируют обычно надземные павильоны, а при использовании насосов типа ЭЦВ — подземные. В случае установки на скважинах горизон-

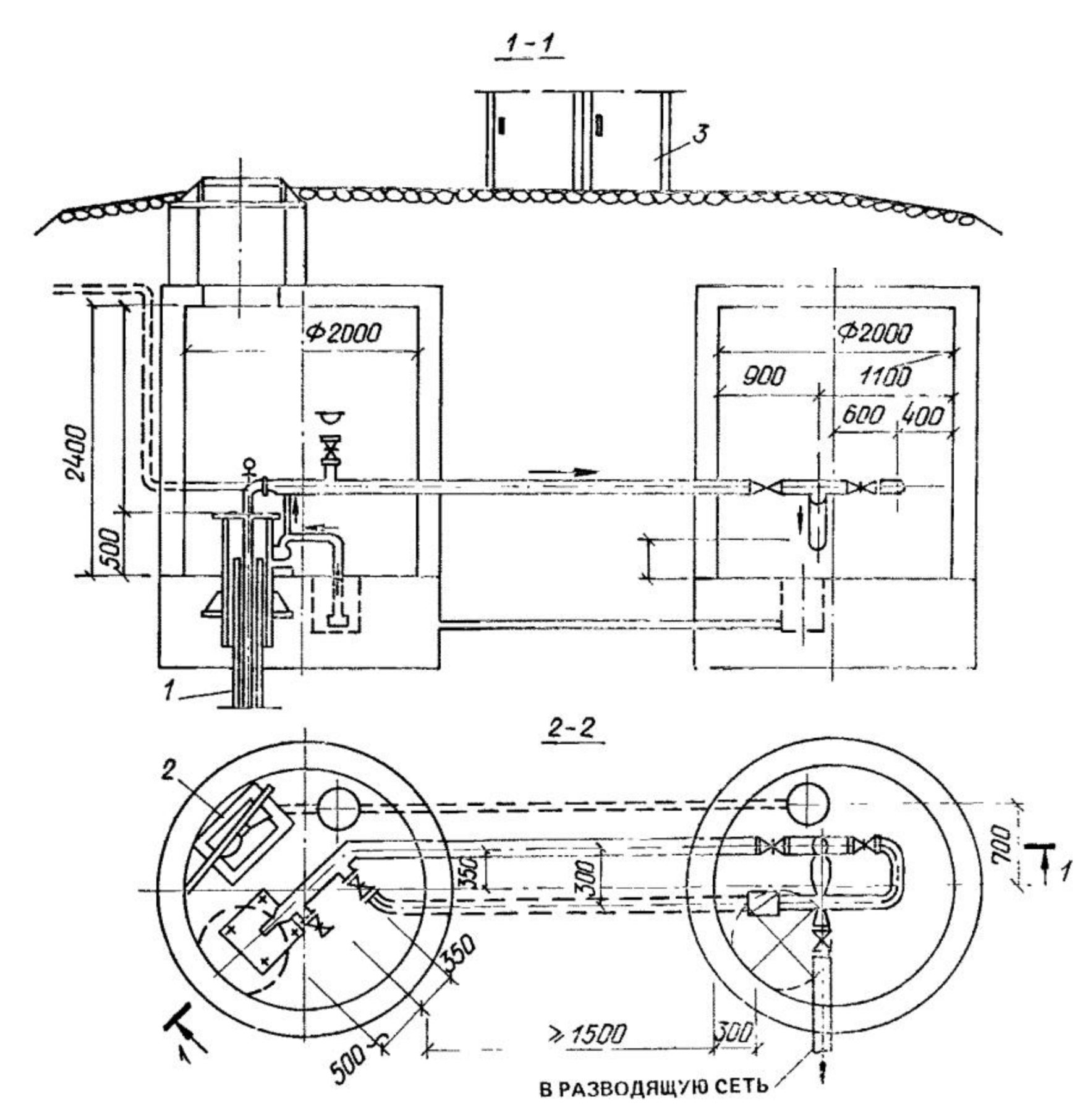
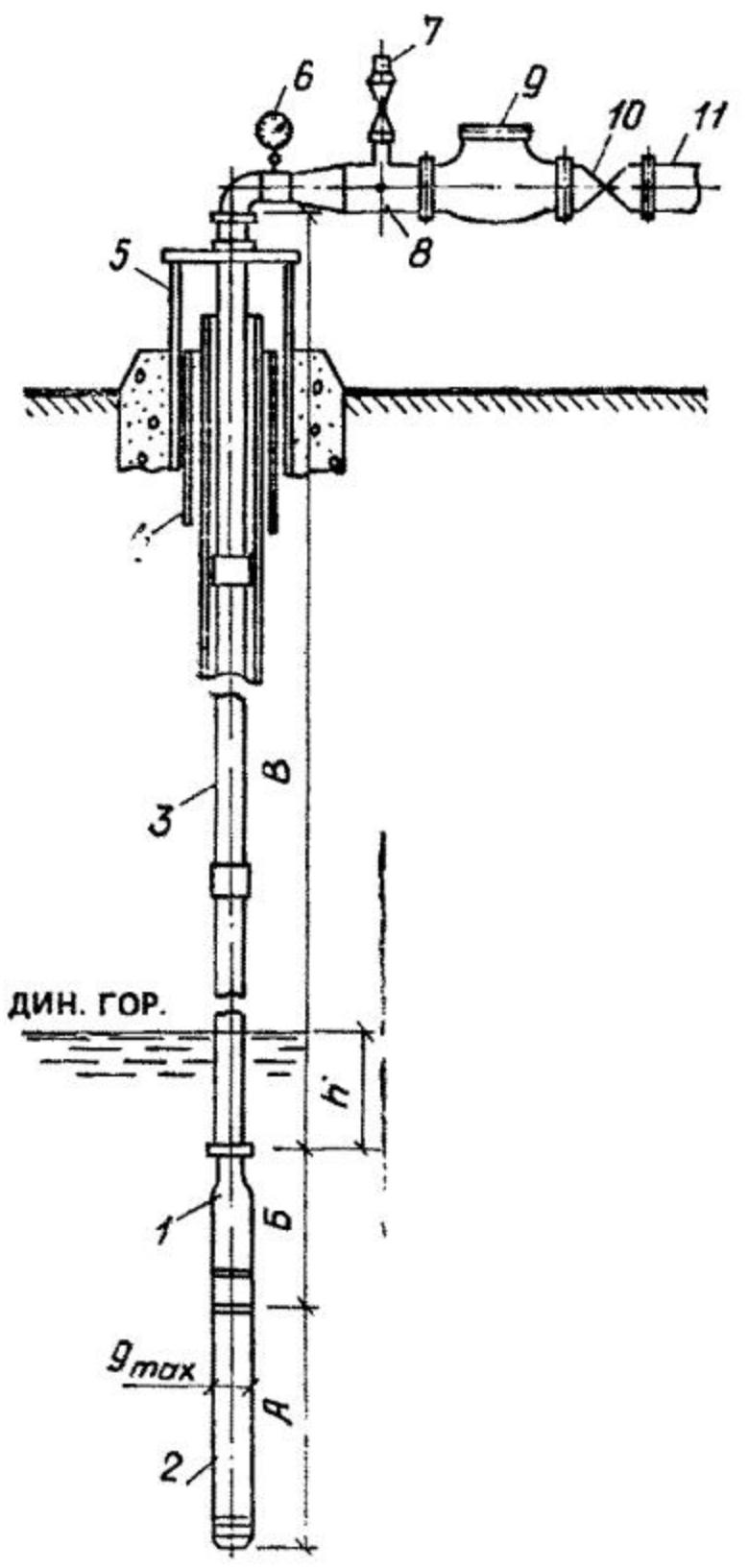


Рис. 5.2. Насосная станция над скважиной (подземная)
1 — насос ЭЦВ; *2* — дренажный насос; *3* — щит управления

тальных центробежных насосов павильоны могут быть надземными, а при необходимости сокращения высоты всасывания — подземными. При установке всех типов насосов в подземных павильонах (шахтах) непременным условием является их устройство в сухих грунтах.

Напорные линии насосов оборудуют аппаратурой для замера расходов воды и по защите скважин и водоводов от гидравлических ударов. Характерные схемы оборудования арматурой насосных установок приведены на рис. 5.3 и 5.4.

Для контроля и управления водозаборные сооружения оборудованы прибором для измерения расхода воды, подаваемой каждой скважиной, электроуровнемером для измерения уровня воды в скважине, манометром для оценки давления на насосах, мановакуумметром при работе горизонтальных насосов на всосе.



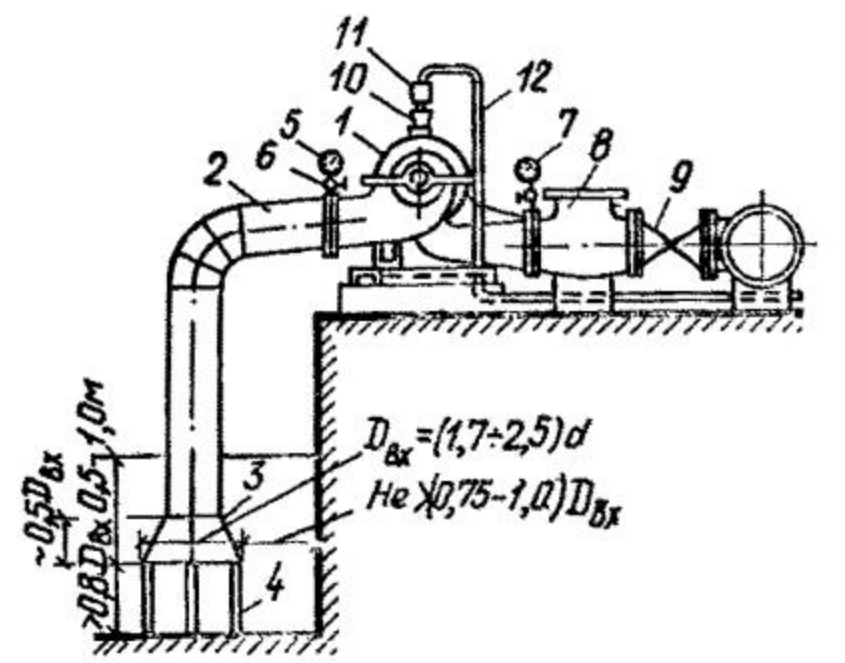


Рис. 5.4. Схема оборудования арматурой горизонтального центробежного насоса

1 — насос; *2* — косой переход; *3* — всасывающая воронка; *4* — подставка под воронку; *5* — вакуумметр; *6* — трехходовой кран; *7* — манометр; *8* — обратный клапан; *9* — задвижки; *10* — вентиль; *11* — указатель движения воздуха; *12* — воздухопровод вакуум-установки

◀ **Рис. 5.3. Схема оборудования скважины насосом и арматурой**

1 — насос; *2* — электродвигатель; *3* — водоподъемные трубы; *4* — обсадные трубы скважины; *5* — герметизированный оголовок скважины; *6* — манометр; *7* — сбросной трубопровод; *8* — кран отбора проб; *9* — обратный клапан; *10* — задвижка; *11* — напорный трубопровод

Привод насоса ЭЦВ осуществляется комплектно поставляемой станцией управления с электродными датчиками уровней, которая обеспечивает работу погружного насоса в режиме автоматического или телемеханического управления. Насосная станция может работать одиночно или в группе в режиме автоматического управления.

5.2. Насосы и насосные станции на горизонтальных и лучевых водозаборах и каптажах источников

На горизонтальных и лучевых водозаборах находят применение подземные, заглубленные и шахтные насосные станции. Степень заглубления станции определяется допустимой вакуумметрической высотой всасывания насосного оборудования. На горизонтальных и лучевых водозаборах насосные станции, как правило, совмещают с водосборным колодцем (рис. 5.5). Шахтные насосные

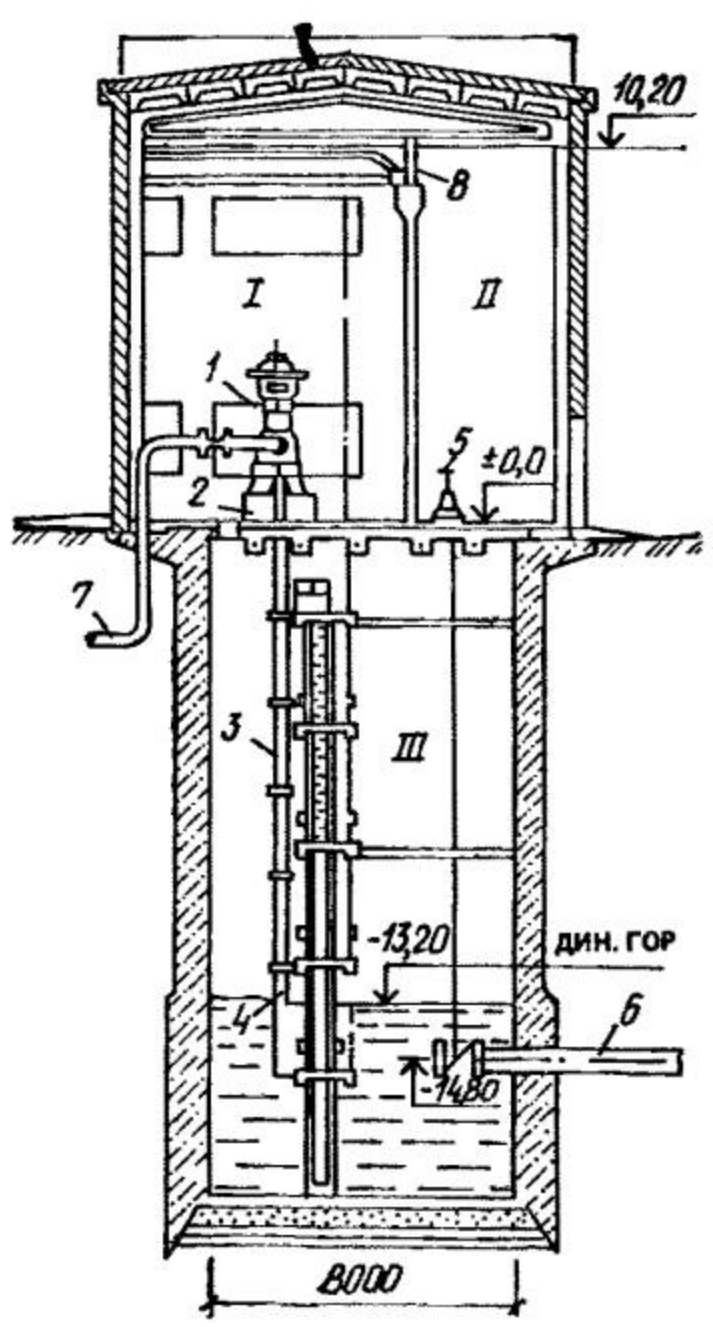


Рис. 5.5. Насосная станция в сборном колодце

I — машинный зал; *II* — вспомогательное помещение; *III* — водоприемная шахта; *1* — электродвигатель; *2* — опорная часть насосной установки; *3* — водоподъемный трубопровод; *4* — насос; *5* — колонка управления задвижкой; *6* — водоприемная горизонтальная дрена; *7* — напорный трубопровод; *8* — кран-балка

станции, совмещенные с водосборным колодцем, обычно оборудуют насосными установками типа ЭЦВ, АТН или НА. Насосные станции с горизонтальными центробежными насосами на каптажах источников располагают непосредственно возле каптажной камеры или сборного резервуара по типовым проектам, разработанным Харьковским Водоканалпроектом, Мосгипротрансом и др. При оборудовании шахтных колодцев используют насосы всех указанных типов в соответствии с требуемым водоотбором и положением динамического уровня в колодце.

5.3. Оборудование и эксплуатация водозаборных скважин с беструбной установкой погружных электронасосов

Конструкцию устройств, обеспечивающих подъем воды из скважин насосами по обсадным трубам, можно разделить на две группы: первая — разделение зон всасывания и нагнетания осуществляется пакерными устройствами (механическими, гидравлическими, газовыми), а усилие передается через трос на устье скважин (рис. 5.6); вторая — герметизация и передача усилий происходят в месте установки устройства (рис. 5.7).

Преимущество устройств первой группы заключается в том, что создается возможность их применения на существующих скважинах. Для устройств второй группы требуется специальная кон-

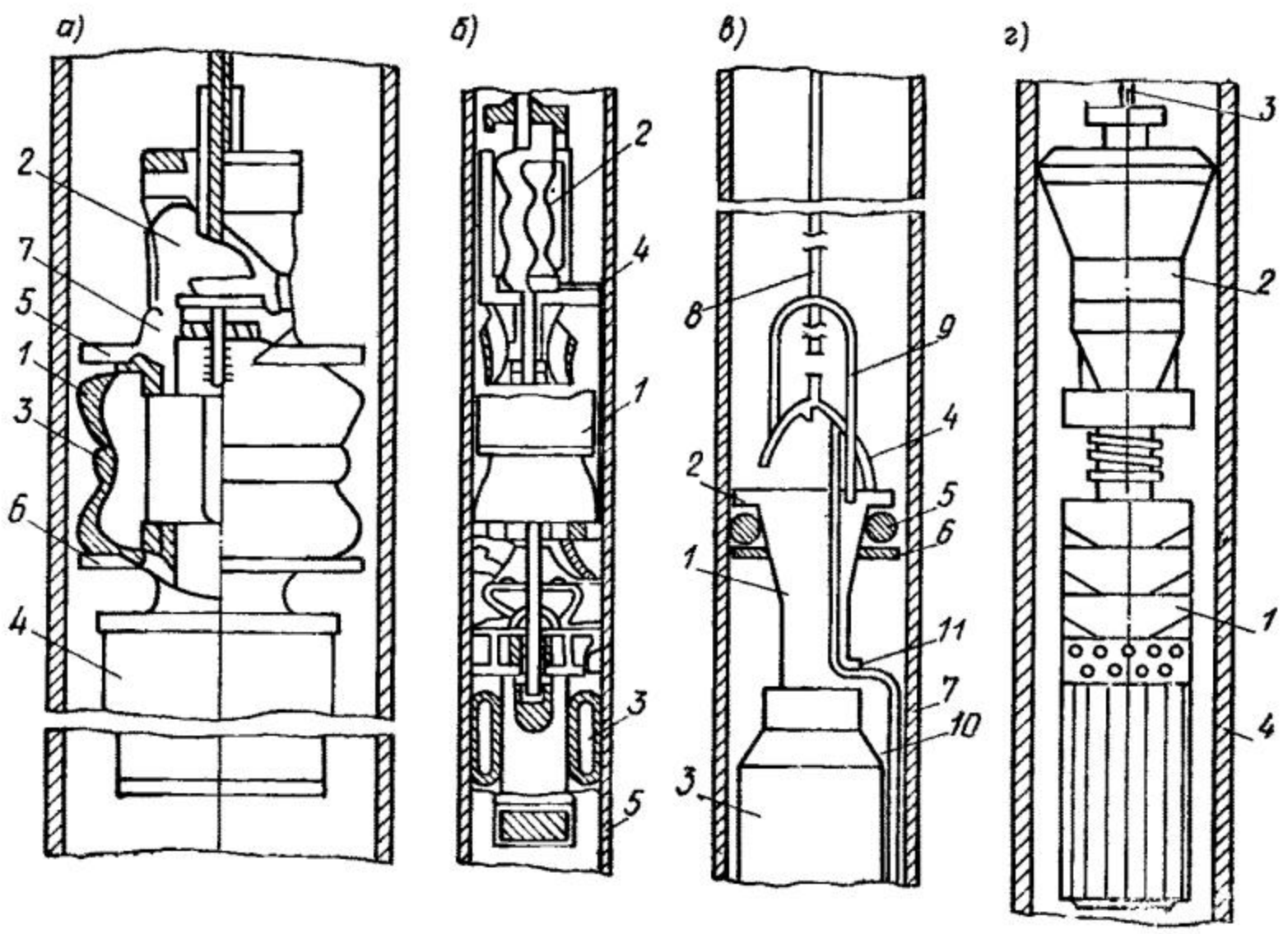


Рис. 5.6. Устройства беструбной подвески

а — с гидравлическим пакером; *б* — с дополнительной ступенью; *в* — с механическим пакером; *г* — с насосным уплотнением и разуплотнением

струкция скважин, но они отличаются простотой уплотнения и наличием упоров, которые исключают необходимость использования троса или штанг в качестве несущих.

На рис. 5.6, *а* представлена конструкция устройства с гидравлическим пакером, состоящая из эластичного пакера *1*, охваченного резиновым упругим кольцом *3*, сжимающим его при остановке насоса *4*. Вода подается во внутреннюю полость пакера через специальные щели в патрубке *7*, соединенном с насосом. На патрубке имеются два фланца *5* и *6*, обеспечивающие разжатие пакера в радиальном направлении, т. е. к внутренней стенке обсадной трубы *8*. Для создания перепада давления между внутренней полостью пакера и надпакерным пространством на патрубке установлен дроссель *2*.

Принцип действия устройства, представленного на рис. 5.6, *б*, заключается в том, что насос *1* снабжен дополнительной ступенью *2* с приводом от вала насоса. Дополнительная ступень через нагнетательный трубопровод *4* повышает напор в камере пакера *3*. Это дает возможность создавать в камере пакера более высокое давление, чем в напорной части скважины обсадной трубы *5*.

Типичным механическим пакерным устройством является конструкция ЮжНИИГиМа. Принцип действия устройства (рис. 5.6, *в*) отличается конструктивной особенностью уплотнительного элемента *5*, который разжимается до обсадной трубы *7* по раструбу *1* между опорным кольцом *6* и фланцем *2*. В рабочем положении

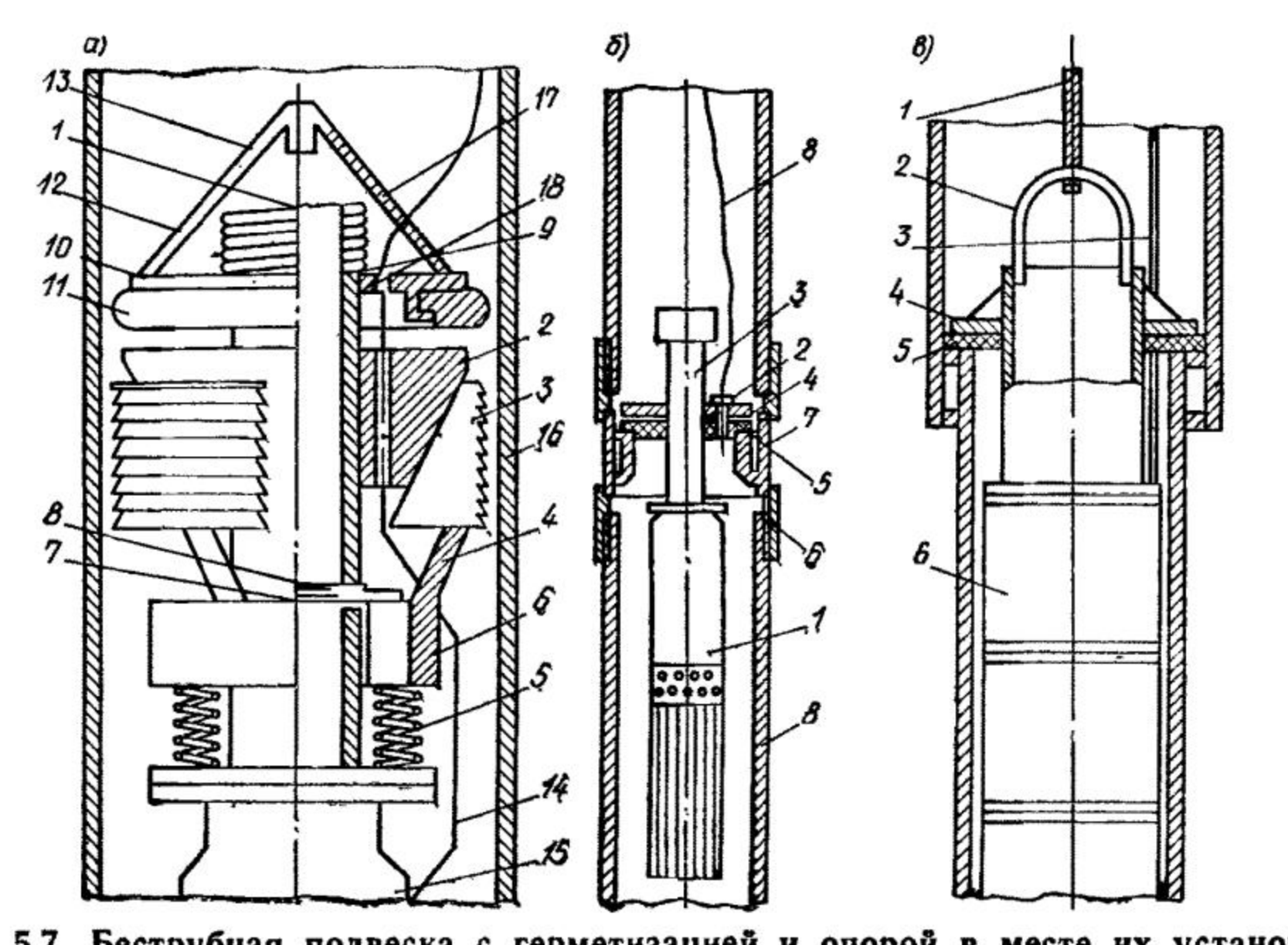


Рис. 5.7. Беструбная подвеска с герметизацией и опорой в месте их установки
а — с подпружиненным кольцом; *б* — с посадочным гнездом треста Курсксельхозводстрой; *в* — с опорным фланцем ЦНИИКИВР

устройство удерживается с помощью грузового троса *9*, а монтажно-демонтажные работы осуществляются тросом *8* через гибкие стропы *4*.

Испытания показали, что наличие двух канатов приводит к их скручиванию с кабелем и затрудняет монтажно-демонтажные работы при установке насоса в скважину на глубину более 30 м. Промышленностью разработана конструкция устройства для скважин с диаметром обсадных труб 150, 200 и 250 мм (рис. 5.6, *г*). Уплотнение осуществляется подвеской *2* при подаче насосом *1* воды, разуплотнение — после выключения насоса и натяжения каната *3* для слива воды из напорной части обсадной трубы *4*.

Перспективны устройства беструбной подвески с герметизацией и опорой в месте их установки (см. рис. 5.7, *а*). На трубе *1* закреплены неподвижные клинья *2*, подвижные клинья *3* находятся с ними в зацеплении. Подвижные клинья *3* опираются через упоры *4* на подпружиненное с помощью пружин *5* кольцо *6*, установленное на трубе *1* с возможностью перемещения в осевом направлении и имеющее внутренние продольные канавки, перекрываемые сверху концами оси *7* фасонного сечения, проходящей через трубу *1*. Заслонкой *8*, жестко скрепленной с осью *7*, перекрывается труба *1*, в верхней части которой установлена подпружиненная с помощью пружины *9* шайба *10*. Уплотнительный элемент *11* прикреплен к шайбе *10* и имеет возможность перемещаться в осевом направлении. Шайба *10* через тяги *12* и замковое устройство *13* связана с тросом, выведенным на поверхность. По кана-

лам в неподвижных клиньях *2* пропущен силовой кабель *14* для питания электронасоса *15*. Отражатель *17*, соединенный с шайбой *10*, установлен над верхним срезом напорной трубы *1*, верхняя часть которой перфорирована отверстиями *18*. При положении заслонки *8* «закрыто» поперечный размер выходных концов оси *7* больше ширины канавки и меньше — при положении заслонки «открыто».

Устройство работает следующим образом. Перед установкой насоса кольцо *6* осаживается вниз, заслонка становится в положение «закрыто», тем самым концами оси фиксируется положение подпружиненного кольца *6*. Подвижные клинья *3* занимают нижнее положение и не выступают за диаметр неподвижных клиньев *2*. При подвесе насоса *15* пружина *9* сжимается, уплотнительный элемент *11* освобождается от действия пружины и принимает свой минимальный по диаметру размер.

При достижении намеченной глубины включается насос, и под напором жидкости открывается заслонка *8*, поворачивая ось *7*. Концы оси освобождают от фиксации подпружиненное кольцо *6*, которое, перемещаясь вверх, поднимает подвижные клинья *3* до их раскрепления между неподвижными клиньями *2* и обсадной трубой *16*. Одновременно ослабляется натяжение троса. Под действием собственного веса и пружины *5* насос *15* надежно раскрепляется в обсадной трубе. При раскреплении насоса пружина *9* освобождается от действия его веса и через шайбу *10* разжимает уплотнительный элемент *11* до обсадной трубы.

Для демонтажа насоса натягивается трос, который через шайбу сжимает пружину *9*, и освобождается уплотнительный элемент, а труба *1* с клиньями *2* поднимается, освобождая клинья *3*, которые скользят по обсадной колонне труб, сжимая пружины *5*.

Конструкцией устройства ПМК треста Курсксельхозводстрой (см. рис. 5.7, *б*) при сооружении скважины на глубине установки насоса *1* в обсадной трубе *8* предусматривается специальный патрубок *7* с посадочным гнездом, на которое опирается насос с патрубком *3*. К патрубку приварен фланец *4* с резиновым диском *5*, который служит уплотнителем. Кабель *9* к электродвигателю проходит через сальниковое уплотнение *2* на фланце. Монтаж осуществляется с помощью буровых штанг *6*. При эксплуатации на некоторых скважинах не происходило полное разделение зон всасывания и нагнетания. Увеличение сортамента обсадных труб за счет установки посадочного гнезда снижает эффективность их применения.

На водозаборе Минска по проекту ЦНИИКИВР в 1986 г. была пробурена скважина, на которой установлен один из простейших типов устройств беструбной подвески насосов. Конструкция устройства состоит из отрезка трубы, к которой приварен опорный фланец *4* с резиновой прокладкой *5* толщиной 10 мм и серьга *2* для крепления троса *1* (см. рис. 5.7, *в*). Электрический кабель *3* к насосу *6* проходит через сальниковое уплотнение в опорном

фланце. Насос с устройством устанавливался на переходе обсадной трубы $D_у=300$ мм в надфильтровую $D_у=250$ мм на глубине 38 м.

Скважины с беструбной установкой погружных насосов могут эксплуатироваться и как обычные, и как вакуумные. В первом случае пьезометрический уровень воды в зоне всасывания скважины всегда находится выше отметки пакера; во втором — ниже пакера, и тогда под ним возникает вакуум. Если скважина эксплуатируется с постоянным дебитом, то вакуум под пакером нарастает постепенно, охватывая все бо́льшую по высоте зону всасывающей полости обсадной трубы. Со временем он может распространиться на фильтр и прифильтровую зону скважины.

Конструкция скважины с установкой погружных электронасосов с беструбной подвеской должна отвечать следующим требованиям: обсадные трубы должны обеспечивать герметичность и иметь одинаковый диаметр от места установки кольцевой вставки до устья скважины; диаметр эксплуатационной колонны труб должен соответствовать номинальному диаметру насоса; конструкция оголовка скважины должна обеспечивать полную герметизацию, иметь сальниковые уплотнения для выводных концов кабеля.

Для замера уровня воды в скважине устанавливается пьезометрическая трубка $d \geqslant 3/4''$, соединенная со скважиной с наружной стороны обсадной трубы ниже установки насоса или проходящая внутри обсадной трубы и выведенная с помощью сальникового уплотнения через оголовок. Во втором случае пьезометрическая трубка используется в качестве монтажно-демонтажных штанг.

Беструбная вакуум-скважина должна быть оборудована двумя пьезометрическими трубками. Одна из них связана с внутренней полостью скважины ниже фильтра (в верхней части отстойника), имеет открытое устье и фиксирует напор во внутренней полости фильтра, другая сообщается с обсадной трубой непосредственно под пакером, имеет герметизированное устье и отводящую трубку, снабженную вакуумметром.

Этот пьезометр обеспечивает возможность не только фиксировать величину разрежения под пакерным устройством, но и при необходимости через свое разгерметизированное устье стравливать накопившийся под пакером воздух в атмосферу (при возникновении здесь давления, превышающего атмосферное) либо откачивать его при помощи питаемого от напорного трубопровода насоса, эжекторного устройства, приемная камера которого сообщена с устьем пьезометрической трубки.

Для снижения потерь напора на обтекание потоком электродвигателя насоса и исключения кавитационных явлений, особенно в пусковой период, диаметр эксплуатационной колонны труб ниже кольцевой вставки по длине погружного электронасоса на 50 мм и больше номинального диаметра насоса.

Гидравлические испытания напорной части обсадной колонны труб необходимо проводить в соответствии с требованиями испытаний напорных трубопроводов. Для испытания устройство беструбной подвески с погружным электронасосом с обратным клапаном и соответствующим развиваемым напором на закрытую задвижку монтируют в скважине. Последняя оборудуется герметичным оголовком, а на отводящем трубопроводе устанавливается задвижка. Пуск насоса производится на закрытую задвижку без выпуска воздуха из обсадной колонны труб. После того как насос создаст максимальное давление, он отключается. По установленному на оголовке скважины манометру определяют герметичность напорного участка обсадной колонны труб и устройства беструбной подвески насоса.

При эксплуатации беструбной вакуум-скважины по пьезометрам фиксируют напор в фильтре и вакуум под пакерным устройством. Эти данные позволяют оценить уровень воды в скважине и не допустить его отклонения от заданных пределов. Последнее может быть достигнуто регулировкой задвижки, размещенной за устьем скважины, а также установкой датчиков нижнего и верхнего уровней автоматической станции управления. Нижний датчик устанавливается на 20—30 см ниже отметки расчетного уровня, а верхний — на отметке нижней линии пакера.

В случае недопустимого снижения вакуума под пакером его восстанавливают временной остановкой насоса. При этом уровень воды под пакером повышается, скопившийся там воздух приобретает давление, превышающее атмосферное, и может быть выпущен в атмосферу через предварительно разгерметизированный пьезометр. Последующему пуску должны предшествовать заливка пьезометрической трубки водой до устья и ее герметизация. В этом случае, когда остановка насоса недопустима или приток воздуха значителен, откачка последнего производится эжектором.

В переходных процессах пуска и остановки насосов при подаче воды по обсадным трубам отсутствуют явления гидравлических ударов в скважине, за исключением случая пуска при наличии глубокого вакуума в напорной линии. При этом величина повышения давления при гидравлическом ударе значительно ниже, чем при аналогичном режиме пуска насоса, установленного на водоподъемных трубах.

Скважины с беструбной установкой погружных насосов во многих случаях могут успешно заменить скважины традиционной конструкции. Наиболее эффективно их использование в системе водоснабжения, когда откачка, как правило, производится сравнительно глубокими скважинами из водообильных водоносных горизонтов, т. е. там, где экономия труб и выгоды, связанные с уменьшением потерь напора на пути от погружного насоса до поверхности земли, наиболее значительны.

ГЛАВА 6. ВОДОЗАБОРЫ ИЗ СКВАЖИН

6.1. Схемы компоновки водозаборов и подачи воды при использовании подземных источников

Имеется много вариантов схем подачи воды при использовании подземных источников водоснабжения. Одним вариантом предусматривается подача воды непосредственно в водопроводную сеть из неглубоких подземных вод при помощи буровой скважины или шахтного колодца и насосной станции первого подъема, расположенной в отдельном здании.

В другом случае источником водоснабжения служат подземные воды различных водоносных горизонтов, залегающих на разной глубине от поверхности земли. Эксплуатация осуществляется при помощи группы вертикальных водозаборов, каждый из которых оборудован отдельным водоподъемником, направляющим воду в сборный резервуар. Из него вода подается в сеть насосами второго подъема или, минуя его, непосредственно в сеть.

Имеются схемы, в которых предусматривается подача воды из неглубоко залегающих подземных вод при помощи группового вертикального водозабора. Вода поднимается насосами, расположенными в здании станции первого подъема, подается в сборный резервуар и затем в сеть насосами станции второго подъема. В некоторых случаях вода из вертикального водозабора (буровой скважины) при помощи всасывающих трубопроводов, работающих под вакуумом, направляется в сборный резервуар, откуда насосами подается в сеть. Насосная станция в этом случае часто располагается непосредственно под резервуарами. Аналогичную схему можно применить и при сифонной системе водоподачи.

При использовании глубоко залегающих подземных вод, подъем воды из вертикального водозабора (буровой скважины) и подача в сборный резервуар осуществляются при помощи эрлифта. Компрессор при этом располагается в здании насосной станции. Аналогичную схему можно применить и при использовании глубоководных погружных насосов.

Оптимальная схема расположения водозаборных скважин определяется гидрогеологическими расчетами, выполненными для нескольких вариантов.

6.2. Расчет водозаборов из скважин

При расчетах водозаборов в качестве исходной величины принимается дебит Q, соответствующий проектируемому водопотреблению при заданном времени эксплуатации и максимально допустимых понижениях уровня $s_{доп}$.

Величина допустимого понижения уровня определяется следующим образом:

в безнапорных водоносных горизонтах

$$s_{доп} = (0{,}5 \ldots 0{,}7)\, h_e - \Delta h_{нас} - \Delta h_ф; \qquad (6.1)$$

в напорных водоносных горизонтах

$$s_{доп} = H_e - [(0{,}3 \ldots 0{,}5m) + \Delta h_{нас} + \Delta h_ф, \qquad (6.2)$$

где h_e — первоначальная глубина воды; H_e — первоначальный напор над подошвой горизонта; $\Delta h_{нас}$ — максимальная глубина погружения насоса под динамический уровень воды в скважине; $\Delta h_ф$ — потери воды на входе в скважину; m — мощность напорного пласта.

В простых гидрогеологических условиях обычно применяют аналитические методы расчета водозаборов. В сложных же условиях — существенная неоднородность водоносных пластов, сложное (в плане и разрезе) очертание их границ, большое число вариантов водозабора с учетом возможности загрязнения, истощения и искусственного подпитывания подземных вод — более предпочтительно применение моделирования.

Величина понижения уровня подземных вод в любой точке водоносного горизонта представляется следующим образом:

для безнапорных водоносных горизонтов

$$s = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{\pi k} R}; \qquad (6.3)$$

для напорных водоносных горизонтов

$$s = (Q/2\pi km)\, R, \qquad (6.4)$$

где Q — суммарный дебит водоотбора; k — коэффициент фильтрации водоносных пород; m — мощность водоносного горизонта (km — коэффициент водопроводимости пласта); h_e — естественная мощность безнапорного водоносного горизонта; R — гидравлическое сопротивление, рассчитываемое в зависимости от условий залегания подземных вод и компоновки водозаборных скважин.

Для определения понижения уровня подземных вод непосредственно в скважине в формулах (6.3) и (6.4) необходимо принять

$$R = R_0 + \beta\xi, \qquad (6.5)$$

где R_0 — величина гидравлического сопротивления R в точке расположения скважины; ξ — показатель дополнительного сопротивления скважины по степени и характеру вскрытия водоносного пласта; $\beta = Q_0/Q$ — отношение расхода рассматриваемой скважины Q_0 к суммарному расходу водозабора Q.

Величину R можно определить в зависимости от граничных условий водоносного пласта и схемы водозабора по многочисленным руководствам и монографиям [1, 23].

Рассмотрим ряд простейших случаев расчета наиболее распространенных типов водозаборных сооружений.

Одиночные скважины и небольшие группы скважин в удалении от границ пласта

$$s_0 = Q_0/4\pi km\, [-E_i\, (r_0^2/4at) + \xi]; \qquad (6.6)$$

группы взаимодействующих скважин

$$s = s_0 + \frac{Q'_{\text{сум}}}{4\pi km} \sum_{i=1}^{n} \alpha_i Ei\left(-\frac{r_i^2}{4at}\right), \qquad (6.7)$$

где Q_0 — расход одиночной скважины, в которой определяется понижение уровня; r_0 — радиус этой скважины, $r_i = r_1, r_2, \ldots$ — расстояния от нее до остальных взаимодействующих скважин; t — время, отсчитываемое от начала откачки; $\alpha_i = Q_i/Q'_{\text{сум}}$ ($\alpha_1 = Q_1/Q'_{\text{сум}}$, $\alpha_2 = Q_2/Q'_{\text{сум}}$); $Q'_{\text{сум}}$ — суммарный дебит всех скважин; n — общее число скважин за вычетом скважины с индексом «0»; a — коэффициент пьезопроводности.

Значения интегральной показательной функции Ei представлены в ряде справочников и руководств [23].

При $r_i^2/4at \leqslant 0{,}05 \ldots 0{,}1$

$$Ei\left(-\frac{r_i^2}{4at}\right) = \ln \frac{2{,}25at}{r_i^2}.$$

Поэтому при длительных периодах откачки формулы (6.6) и (6.7) можно представить в виде

$$s_0 = (Q_0/2\pi km)\,[\ln (R'/r_0) + \xi]; \qquad (6.8)$$

$$s = s_0 + (Q'_{\text{сум}}/2\pi km) \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ln (R/r_i), \qquad (6.9)$$

где R' — некоторый условный радиус влияния скважины или водозабора из небольшого числа компактно расположенных скважин, увеличивающийся во времени.

$$R = 1{,}5\sqrt{at}. \qquad (6.10)$$

Показателем дополнительного сопротивления ξ в приведенных формулах оценивается несовершенство скважин по степени и характеру вскрытия пласта, которые обусловлены меньшей длиной фильтра в сравнении с мощностью водоносного горизонта и дополнительными фильтрационными сопротивлениями на входе в скважину (несовершенство по характеру вскрытия пласта). С введением этого показателя понижение уровня по сравнению с совершенной скважиной возрастает на величину

$$\Delta s = (Q_0/2\pi km)\,(\xi_1 + \xi_2), \qquad (6.11)$$

где ξ_1 и ξ_2 — дополнительные сопротивления, обусловленные соответственно неполнотой и характером вскрытия пласта.

Значения ξ_1 для случая, когда фильтр примыкает к водоупору, приведены в табл. 6.1.

При оценке величины ξ_2 предпочтительно проводить исследования в полевых условиях в ходе опытно-фильтрационных работ и распространить полученные опытные данные при идентичных условиях производства работ по бурению, освоению и оборудованию скважин на эксплуатационный водозабор. В первом прибли-

Таблица 6.1. Показатель сопротивления

l/m	ξ_1 при m/r							
	1	3	10	30	100	500	1000	2000
0,3	0,05	0,65	2,4	4,6	7,25	10,9	12,45	14,1
0,5	0,025	0,33	1,13	2,11	3,25	4,82	5,5	6,2
0,7	0,008	0,12	0,44	0,85	1,34	2,01	2,29	2,6

Примечания. 1. При пользовании таблицей следует иметь в виду, что для безнапорных пластов $m=h_e-s_0/2$; $l=l_0-s_0/2$ (l — длина фильтра; s_0 — понижение уровня в скважине). 2. Если фильтр расположен в средней части пласта, значение ξ_1, определяемое по табл. 6.1, следует уменьшить: при $l/m=0{,}3$ на 1,5; при $l/m=0{,}5$ на 0,7.

жении при бурении скважин ударным или роторным способом с промывкой чистой водой и при использовании фильтров, коэффициент водопроницаемости которых в 5—10 раз превышает водопроницаемость пласта, величину ξ_2 при расчетах скважин можно не принимать во внимание. Однако в целом ряде случаев величины ξ_2 могут быть весьма значительными, соизмеримыми с величинами R и ξ_1, а иногда и существенно превышать их (табл. 6.2).

Водозаборы, состоящие из большого числа взаимодействующих скважин в удалении от границ водоносного пласта с целью упрощения расчетов можно рассматривать в виде обобщенных систем водозаборов: линейного, кольцевого и кругового (площадного). Общая формула для расчета кругового водозабора для длительных периодов эксплуатации имеет вид:

$$s_0=(Q_{\text{сум}}/2\pi km)\,[\ln(R/r_{\text{пр}})+\alpha_0(\ln\sigma/\pi r_0)+\xi], \qquad (6.12)$$

где $\alpha_0=Q_0/Q_{\text{сум}}$ (Q_0 — дебит скважины, в которой определяется понижение уровня; $Q_{\text{сум}}$ — суммарный расход водозабора); r_0 — радиус скважины; σ — половина расстояния между скважинами; $r_{\text{пр}}$ — приведенный радиус обобщенной системы: для линейной системы $r_{\text{пр}}=0{,}37l$ (l — половина длины ряда скважин), для кольцевой $r_{\text{пр}}=R_0$ (R_0 — радиус кольца), для круговой (площадной) $r_{\text{пр}}=0{,}61\,R_0$ (R_0 — радиус круга, оконтуривающий обобщенную систему скважин).

Величина R_0 кольцевой и круговой (площадной) систем скважин

$$R_0=P/2\pi, \qquad (6.13)$$

где P — периметр участка расположения скважин по линии, соединяющей крайние скважины.

При определении понижения уровня в точках, удаленных на расстояние, превышающее половину протяженности водозабора, т. е. при $r>1{,}5l$ в линейной системе скважин и $r>1{,}5R_0$ в кольцевой и площадной системах, можно пользоваться формулой

$$s_0=(Q_{\text{сум}}/2\pi km)\ln(R/r). \qquad (6.14)$$

Таблица 6.2. Сопротивление гидрогеологических скважин при различных способах бурения и освоения

Водоносный горизонт			Способ бурения и освоения скважин	Фильтр		Средний удельный дебит на 1 м понижения уровня, л/с	Данные о сопротивлениях скважин			
геологическая характеристика	режим	коэффициент фильтрации или коэффициент водопроводимости (k, м/сут; km, м²/сут)		тип	диаметр, мм		n (число определений)	$\xi_{2ф}$	$\xi_{2ф\,ср}$	σ'/v
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вертикальный дренаж Горьковской ГЭС										
Аллювиальные пески пойменной террасы Волги	Безнапорный	$k=35—40$	Ударный, прокачка эрлифтом	Гравийный с трубчатым и стержневым каркасом, с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки и штампованного листа. Фильтр-каркас МГМИ.	168	3,5	11	0,43	—	0,4/88,3
				Блочного типа из пористой керамики, на клее БФ, из пористого бетона	240/170	1,93	11	4,75	—	0,42/87,8
Вертикальные дренажи г. Каменка-Днепровская и орошаемого массива «Каменский под»										
Пески четвертичного возраста	С локальным напором	$k=20—30$ $km=400—600$	Роторный с обратной промывкой (без замены раствора), прокачка эрлифтом	Гравийный каркасно-стержневой с проволочной обмоткой	168	4,6	13	0,59	—	1,204/75,6
То же	То же	$k=20—30$ $km=400—600$	Роторный с обратной промывкой чистой водой с заменой промывочной жидкости	Гравийный каркасно-стержневой с проволочной обмоткой	158	5,8	13	—0,19	—	0,128/67,37

Водоносный горизонт			Способ бурения и освоения скважин	Фильтр		Средний удельный дебит на 1 м понижения уровня, л/с	Данные о сопротивлениях скважин			
геологическая характеристика	режим	коэффициент фильтрации или коэффициент водопроводимости (k, м/сут; km, м²/сут)		тип	диаметр, мм		n (число определений)	$\xi_{2ф}$	$\xi_{2ф_{ср}}$	σ'/v
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вертикальный дренаж г. Каменка-Днепровская										
Пески четвертичного возраста	С локальным напором	k=20—30 km=400—600	Роторный с обратной промывкой чистой водой	Гравийный, каркасно-стержневой	168	4,8	23	—	—46	0,41/86,95
То же	То же	k=20—30 km=400—600	Ударный	То же	168	4,2	8	—0,64	—0,74	—
			Роторный с глинистой промывкой. Разглинизация затрубной промывкой	»	168	1,8	14	4,8	—0,48	0,43/68,0
Водозабор «Балтэзерс» г. Рига										
Пески — отложения Балтийского моря	Безнапорные	k=30—50	Ударно-канатный	Пористо-керамический на трубчатом каркасе (после 3—7 лет работы)	170/240	1,97	35	17,07	—	7,37/43,18
				Гравийный с чугунным щелевым каркасом (после 20—30 лет работы)	168	3,84	9	6	—	2,49/40,03

Продолжение табл. 6.2

Водоносный горизонт			Способ бурения и освоения скважин	Фильтр		Средний удельный дебит на 1 м понижения уровня, л/с	Данные о сопротивлениях скважин			
геологическая характеристика	режим	коэффициент фильтрации или коэффициент водопроводимости (k, м/сут; km, м²/сут)		тип	диаметр, мм		n (число определений)	$\xi_{2ф}$	$\xi_{2ф ср}$	σ'/v
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				Гравийно-клеевой (после 7—10 лет работы)	170/240	2,52	8	10,65	—	9,1/85,52
Шемиловский полигон ВСЕГИНГЕО										
Пески четвертичного возраста, мелко- и среднезернистые	Безнапорные	k= =30—50	Роторный с глинистой промывкой	Фильтры ФКО (опытные скважины)	168	—	5	20,6	—	—

Примечание. σ' — среднее квадратическое отклонение; v — коэффициент вариации.

При расчете дебита одиночных и небольших групп взаимодействующих скважин вблизи рек или каналов используются следующие формулы:

для одиночной скважины

$$s_0 = (Q_0/2\pi Rm)\,[\ln(\rho_0/r_0) + \xi]; \qquad (6.15)$$

для группы взаимодействующих скважин

$$s = s_0 + (Q/2\pi km)\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \ln(\rho_i/r_i), \qquad (6.16)$$

где ϱ_0, ϱ_i — расстояния от точки, в которой определяется пониженне уровня (для одиночной скважины ϱ_0) до соответствующих зеркальных отображений реальных скважин относительно прямолинейного уреза реки.

При расположении линейного ряда скважин параллельно урезу воды в реке могут использоваться следующие формулы.

Для ряда скважин ограниченной длины

$$s_0 = \frac{Q}{2\pi km}\left[\ln\sqrt{1+\frac{2L}{l}} + \frac{2L}{l}\operatorname{arc\,tg}\frac{l}{2L} + \right.$$
$$\left. + \frac{\sigma}{l}\left(\ln\frac{\sigma}{\pi r_0} + \xi\right)\right], \qquad (6.17)$$

где L — расстояние ряда от реки; l — половина длины ряда скважин; σ — половина расстояния между скважинами в ряду.

По приведенной формуле (6.17) определяется понижение уровня в центральной скважине ряда.

В точках, удаленных от ряда скважин и лежащих на линии, проходящей посередине ряда (нормально к нему),

$$s_0 = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi km}\left[\frac{1}{2}\ln\frac{l^2+(y+L)^2}{l^2+(Y-L)^2} - \frac{y}{L}\right]\times \operatorname{arc\,tg}\frac{2lL}{y^2-L^2+l^2} +$$
$$+ \frac{L}{l}\operatorname{arc\,tg}\frac{2ly}{y^2-L^2-l^2}. \qquad (6.18)$$

Для ряда скважин неограниченной длины при $l/L>5$

$$s_0 = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi km}\left[\frac{\pi L}{l} + \frac{\sigma}{l}\left(\ln\frac{\sigma}{\pi r_0} + \xi\right)\right]. \qquad (6.19)$$

Для определения понижения уровня в точках между рекой и рядом скважин, т. е. при $0<x<L$,

$$s = Q_{\text{сум}}x/2lkm, \qquad (6.20)$$

а в точках от ряда скважин в глубь берега при $x>4$

$$s = Q_{\text{сум}}L/2lkm. \qquad (6.21)$$

Кроме дополнительного сопротивления, связанного с несовершенством водозаборных скважин, при расчетах следует учиты-

вать дополнительные потери напора при расположении скважин у реки, дно которой сложено относительно слабопроницаемыми в сравнении с пластовыми отложениями. В частности, это характерно для водохранилищ и рек с обильным и мелкодисперсным твердым стоком, приводящим к заилению и кольматации русловых отложений. Дополнительное понижение уровня $\Delta s_к$ в одиночной или обобщенной системе взаимодействующих скважин определяется по формуле

$$\Delta s_к = -(Q_{сум}/2\pi km)\, l^{L\psi} Ei(-2L\psi); \qquad (6.22)$$

для линейного ряда скважин

$$\Delta s_к = Q_{сум}/2lkm\psi, \qquad (6.23)$$

где ψ — дополнительное сопротивление русловых отражений

$$\psi = \frac{k_1 m_1}{km}\sqrt{\frac{k_0}{k_1 m_1 m_0}}, \qquad (6.24)$$

где k_0 и m_0 — коэффициент фильтрации и мощность слоя с пониженной проницаемостью в русле реки; $k_1 m_1$ и km — коэффициенты водопроводимости пород соответственно в русле под слабопроницаемой прослойкой и в берегах; функция $Ei(-2L\psi)$ — интегральная экспоненциальная функция от аргумента $z = 2L\psi$ (L — расстояние скважины от реки).

Во всех приведенных зависимостях понижение уровня справедливо для напорных водоносных пластов, где $s = H_e H$ (здесь H_e — первоначальный напор в пласте и H — напор в процессе эксплуатации). Их можно использовать и в случае расчета скважин в безнапорных водоносных горизонтах, если величина понижения уровня не превышает $0{,}2h_e$ — первоначальной глубины воды до водоупора, до ввода в действие водозабора (статический уровень).

В случае проектирования больших понижений в безнапорных водоносных горизонтах в приведенных соотношениях исключается величина m (мощность напорного водоносного горизонта), а в левой их части вместо понижения уровня записывается параметр u, связанный с понижением уровня в безнапорном водоносном горизонте формулой

$$s = h_e - h = h_e - \sqrt{h_e^2 - 2u}, \qquad (6.25)$$

где h — глубина воды в процессе эксплуатации (динамический уровень).

Так, например, для одиночной скважины формулу (6.6) можно записать

$$u_0 = \left[\frac{Q_0}{4\pi k} - Ei\left(\frac{r_0^2}{4at}\right) + \xi\right]. \qquad (6.26$$

Аналогичные преобразования делают и для других схем водозаборов по расположению их в водоносных пластах.

ГЛАВА 7. КОМПЛЕКСНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВОДОЗАБОРОВ ИЗ СКВАЖИН

7.1. Расчеты режимов работы одиночных скважин

Современные системы водоснабжения из подземных источников представляют собой комплекс взаимосвязанных сооружений. С одной стороны, эта связь проявляется в результате интерференции скважин, с другой — за счет того, что взаимодействующие скважины объединены между собой системой сборных водоводов. Взаимодействие этих крупных элементов в значительной степени зависит от особенностей водоподъемного оборудования, устанавливаемого в скважинах.

В существующих работах по расчету водозаборов подземных вод не уделено должного внимания этому обстоятельству: в них рассматриваются либо задачи гидрогеологического расчета и оценки запасов подземных вод, либо вопросы гидравлического расчета и технического оснащения системы подачи воды от скважин. Сложившийся таким образом подход к проектированию водозаборов подземных вод приводит к тому, что введенные в действие сооружения уже с первых лет эксплуатации работают в режиме, не соответствующем расчетному. Вместе с тем эффективная работа водозаборов подземных вод может быть обеспечена лишь в том случае, если на стадии их проектирования и реконструкции учитываются основные факторы, отражающие взаимодействие отдельных сооружений в процессе эксплуатации системы. В связи с этим весьма актуальной становится задача по повышению эффективности действия водозаборов подземных вод. Решение этой задачи в значительной степени связано с разработкой методики комплексного расчета водозаборов подземных вод и методики оценки эффективности мероприятий по интенсификации их действия.

При эксплуатации систем водоснабжения, кроме того, прослеживается взаимосвязь между производительностью скважин и водозабора в целом при изменении гидродинамического режима подземных вод, а также гидравлических параметров отдельных сооружений.

Основной задачей комплексного расчета водозаборов подземных вод является определение истинных значений расходов скважин и понижений в них уровня воды, а также расходов и потерь напора в сборных водоводах и параметров работы водоподъемного оборудования. Поэтому такие расчеты следует проводить при различных расчетных режимах и на различные периоды эксплуатации водозаборов (т. е. с учетом сезонных колебаний уровней и сработки запасов подземных вод, кольматажа и выхода скважин из строя, отключения отдельных линий сборных водоводов и т. п.) и на основе этого намечать сроки проведения мероприятий, направленных на поддержание стабильной работы систем.

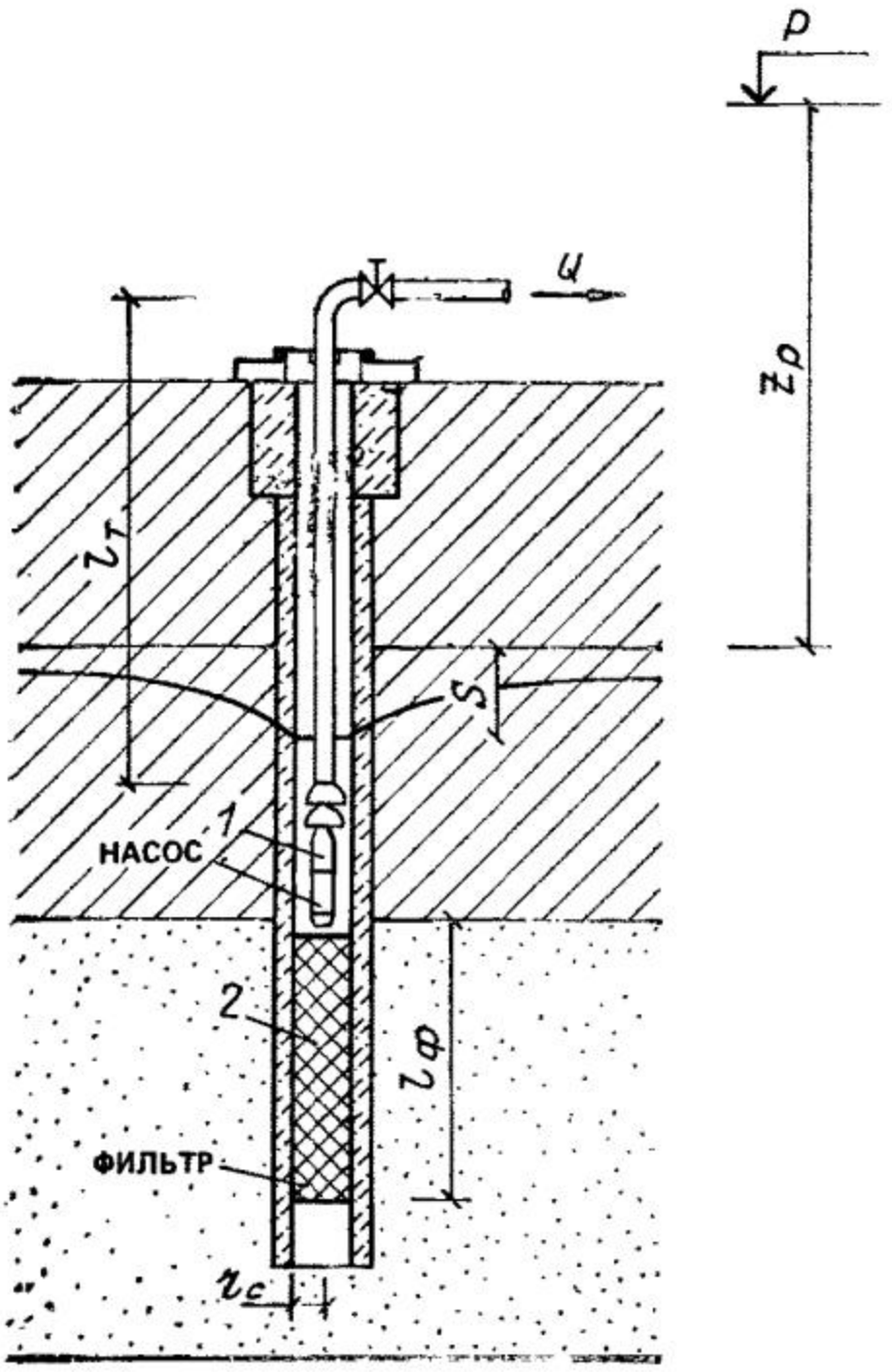


Рис. 7.1. Схема подачи воды от скважин

1 — насос; *2* — фильтр

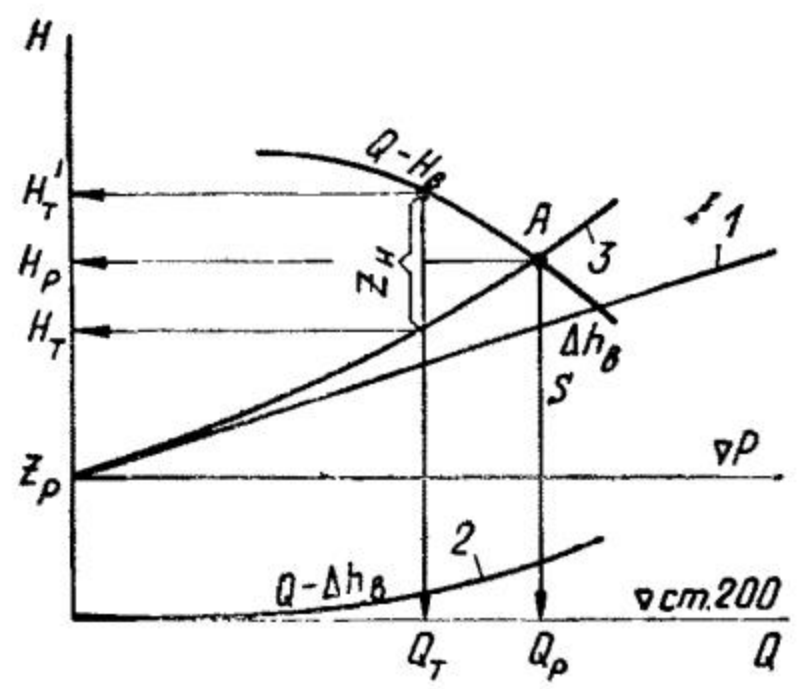


Рис. 7.2. Графоаналитический метод расчета системы «скважина — насос — водовод — резервуар»

Для этой цели во ВНИИ ВОДГЕО разработан пакет прикладных программ и «Рекомендации по применению ЭВМ для выполнения комплексных расчетов водозаборов подземных вод».

Исходным материалом для выполнения таких расчетов являются:

а) гидрогеологическая расчетная схема расположения водозаборных и инфильтрационных сооружений;

б) запроектированная схема сбора воды от скважин;

в) принятая в проекте высотная схема подачи воды потребителю.

При отборе воды из скважины (рис. 7.1) напор насоса H затрачивается на преодоление геометрической высоты подъема воды z, понижение уровня s и потерь напора в водоводе Δh от скважины до точки подачи воды. Насос, установленный в скважине, развивает напор, равный

$$H = (\nabla P - \nabla_{ст.гор}) + s + \Delta h_в, \qquad (7.1)$$

где H — полная высота подъема воды из скважины; ∇P — отметка уровня воды в резервуаре; $\nabla_{ст.гор}$ — отметка статического уровня грунтовых вод; s — понижение уровня в скважине; $\Delta h_в$ — потери напора в водоводе от скважины до резервуара, включая потери напора в водоподъемных трубах.

Разность отметок $(\nabla P - \nabla_{ст.гор})$ — это геометрическая высота подъема воды из скважины. Если эти отметки не изменяются, то $(\nabla P - \nabla_{ст.гор}) = \text{const}$. С другой стороны, насос развивает напор

в соответствии с его рабочей характеристикой $Q-H$, которая в диапазоне оптимальных значений к. п. д. может быть аппроксимирована уравнением

$$H=A-BQ^2, \tag{7.2}$$

где A и B — параметры характеристики $Q-H$ насоса.

Подстановка (7.2) в (7.1) и учет зависимости $s=\psi(Q)$ и $\Delta h_в=\psi(Q)$ дает

$$z=(Q/2\pi km)(R+\xi)+l_в A_в Q^2=A-BQ^2. \tag{7.3}$$

Применительно к одиночным скважинам уравнение (7.3) может быть решено графически. Для этого координаты $Q-H_в$ следует расположить таким образом, чтобы точка $H=0$ находилась на отметке $\nabla_{ст.гор}$. Тогда линия $\nabla=\text{const}$ на графике (рис. 7.2) определит геометрическую высоту подъема воды из скважины, а кривая *1* — характеристику скважины $Q-s$ (характеристика скважины может быть построена как по опытным данным, так и на основе расчетов). Наконец, задаваясь гидравлическим сопротивлением, строят характеристику водовода $Q-\Delta h_s$ (кривая *2*).

При сложении характеристик $Q-s$ и $Q-\Delta h_в$ на линии $\nabla=\text{const}$ находится совмещенная характеристика (кривая *3*) скважины, водовода и резервуара, представляющая собой график зависимости полной высоты подъема воды от производительности скважин.

На рис. 7.2 показана также характеристика $Q-H$ насоса, который предполагается установить в скважине. Пересечение ее с кривой *3* дает рабочую точку насоса с координатами $Q_р$ и $H_р$ (где $Q_р$ — действительная производительность насоса и $H_р$ — напор, развиваемый насосом при такой подаче воды). Одновременно с этим определены также величины $s_р$ в скважине и $\Delta h_в$ в водоводе.

Зачастую из имеющегося сортамета не удается подобрать насос, рабочая точка которого точно бы соответствовала требуемым значениям $Q_т$ или $H_т$ скважины. Поэтому на практике насосы подбирают с некоторым запасом по напору и производят регулирование их производительности. Такое регулирование, как правило, осуществляется с помощью задвижек, установленных на напорной линии; реже — изменением числа рабочих колес насоса.

В том случае, когда производительность насосов регулируется установкой дросселя на напорной линии присоединения скважины к водоводу, к. п. д. установки резко снижается и составляет

$$\eta=\eta_у[1-(zH/H_н)],$$

где η — к. п. д. установки, снятый с графика $Q-H$ при заданном Q насоса; $H_н$ — напор насоса, соответствующий подаче Q за вычетом потерь напора $\Delta h_в$ в водоводе; zH — величина дросселирования.

Такой способ регулирования ввиду неэкономичности не может быть рекомендован на длительное время, особенно в том слу-

чае, когда значения zH велики ($zH > \Delta H_н$, где $\Delta H_н$ — напор, развиваемый одним рабочим колесом насоса).

При $zH > \Delta H_н$ регулирование производительности насосных установок следует производить изменением числа рабочих колес. Число колес, которые необходимо снять с насоса, определяется выражением $\bar{n} = zH/\Delta H_н$ с округлением $\bar{n}$ до ближайшего наименьшего целого значения.

В том случае, если $zH > \bar{n}\Delta H_н$, то одновременно с изменением числа рабочих колес для обеспечения заданной производительности насоса производится установка дросселя на напорной линии. Величина дросселируемого напора при этом составляет

$$zH' = zH - n\Delta H_н.$$

Пусть по условию требуется обеспечить подачу воды в резервуар в количестве $Q_т$, причем $Q_т < Q_р$. Этому расходу на совмещенном графике соответствует точка B с координатами $Q_т$ и $H_т$. Напор же насоса при подаче воды в количестве $Q_т$ равен $H'_т$ ($H'_т > H_т$). Следовательно, величина дросселируемого напора составляет $H' = (H'_т - H_т)$. На пересечении перпендикуляра, восстановленного из точки B на ось абсцисс, с линиями I и II лежат искомые значения всех переменных zH', $\Delta h_в$ и s при подаче воды в количестве $Q_т$.

При изменении какой-либо из составляющих (см. рис. 7.2) происходит смещение рабочей точки насоса по характеристике $Q - H$. Так, например, сработка запасов подземных вод приводит к увеличению геометрической высоты подъема из скважин, т. е. к увеличению H насоса и соответственно уменьшению Q. Аналогичная картина наблюдается и при увеличении гидравлического сопротивления фильтра скважин, обусловленного кольматажем.

Время T_s, в течение которого не происходит нарушения условий $s_р \leqslant s_{доп}$ или $Q_р \geqslant Q_т$, можно считать периодом устойчивой работы скважин. Однако на практике это время, как правило, оказывается меньше расчетного срока действия скважин.

Допустим, что характеристика скважины (рис. 7.3, *а*, кривая *1*) была определена на период сооружения, а в процессе ее эксплуатации гидравлическое сопротивление фильтра возросло, и характеристика стала определяться кривой *II*. В результате этих изменений рабочая точка насоса сместится из точки B в точку B'. При этом, как видно из графика, понижение уровня воды в скважине составит $s' > s$, а производительность ее уменьшится на величину ΔQ. Чтобы графические построения были более наглядными, на рис. 7.3, *а* характеристика $Q - H$ насоса заменена на так называемую дроссельную характеристику, полученную вычитанием из ординат H потерь напора в водоводе $\Delta h_в$.

Для обеспечения требуемой производительности установки в количестве $Q_т$ следует уменьшить потери напора на дросселе на величину $(s' - s)$, и они должны составить $(zH)' = (zH) - (s' - s)$. При этом понижение уровня воды в скважине возра-

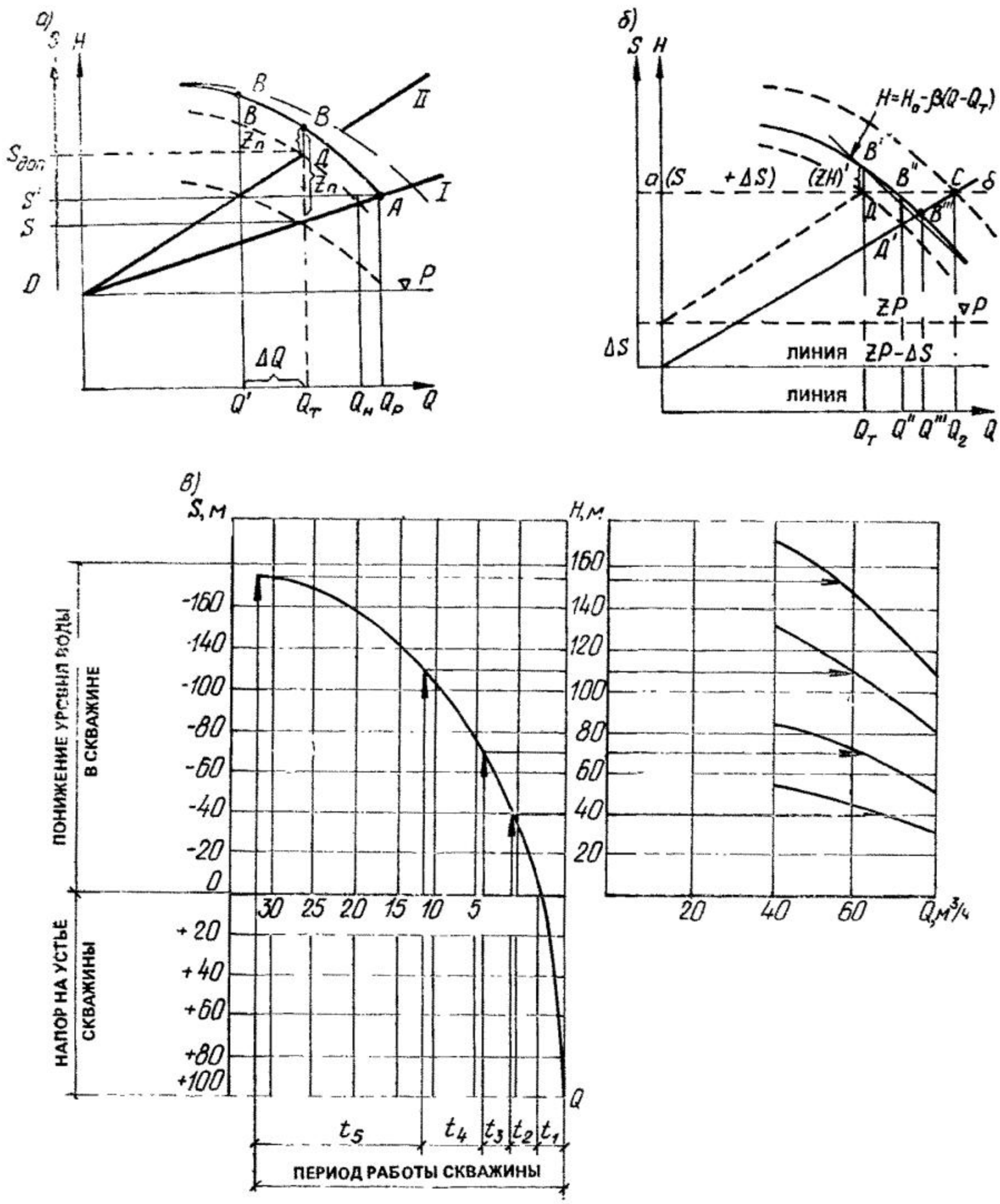


Рис. 7.3. Графоаналитический метод решения задач

а — регулирование производительности скважины; *б* — расчет прироста производительности скважин при ИВПВ; *в* — расчет и подбор водоподъемного оборудования артезианских скважин

стает. Поэтому такой способ регулирования производительности можно применять лишь в течение определенного срока эксплуатации, пока понижение в скважине будет меньше, чем $s_{доп}$, или пока значение $(zH)'>0$.

На рис. 7.3, *а* точка *Д* соответствует условию, когда при $Q=Q_т$, $(zH>0)$, а $s=s_{доп}$. При неизменном $(zH)'$ дальнейший

рост сопротивления вызовет снижение производительности установки. Вместе с тем, если уменьшить $(zH)'$ до значений, при которых подача воды от скважины составила бы $Q_т$, то возрастет понижение уровня воды в скважине и s превысит $s_{доп}$. Следовательно, характеристика скважины, представленная кривой *II*, соответствует условиям, когда фильтр предельно закольматирован и дальнейшая эксплуатация установки без осуществления комплекса мероприятий по восстановлению производительности скважины оказывается невозможной.

Регенерацией фильтра скважины удается добиться уменьшения гидравлического сопротивления до значений, близких к начальному. Тогда при дросселируемом напоре $(zH)'$ производительность установки составит $Q_н > Q_т$, а по мере роста сопротивления подача воды будет снижаться и лишь при достижении предельной закольматированности фильтра скважины окажется равной $Q_т$.

Введение в действие систем ИВПВ вызывает повышение уровня грунтовых вод, а это, в свою очередь, приводит к увеличению производительности насоса, установленного в скважине. Вместе с тем для обеспечения заданного прироста производительности также необходимо осуществлять регулирование работы насоса или производить его замену.

Допустим, что установка ИВПВ введена в действие в момент времени $t = T_s$ (когда фильтр скважины предельно закольматирован) и обеспечила повышение уровня на величину Δs. Тогда, основываясь на гидрогеологических расчетах, оказывается возможным пойти на увеличение отбора воды с доведением его до величины $Q_г$, равной:

$$Q_г = Q_т + [2\pi k m \Delta s / (R_0 + \xi)], \qquad (7.4)$$

где R_0 — фильтрационное сопротивление водоносного пласта при действии водозаборной скважины; ξ — дополнительное сопротивление на несовершенство скважины в момент времени T_s.

На рис. 7.3, *б* величина $Q_г$ является абсциссой точки *C*, лежащей на пересечении характеристики скважины (линия II) и линии *аб* $(s_{доп} + \Delta s)$. Учитывая, что $\Delta s = Q_б R_б / 2\pi k m$, (где $R_б$ — фильтрационное сопротивление водоносного пласта при действии установки ИВПВ), можно найти $\eta_г$:

$$\eta_г = R_б / (R_0 + \xi), \qquad (7.5)$$

где $\eta_г$ — к. п. д. установки ИВПВ, который может быть достигнут в данных условиях.

Рассмотрим, какое же будет получено значение η, если в скважине оставить насос, подобранный без учета работы установки ИППВ (см. рис. 7.3, *а*). В этом случае для нахождения новой рабочей точки насоса необходимо от линии $zP = (zP - \Delta s)$ заново восстановить характеристику скважины до пересечения ее с дроссельной характеристикой насоса (рис. 7.3, *б*). Абсциссой

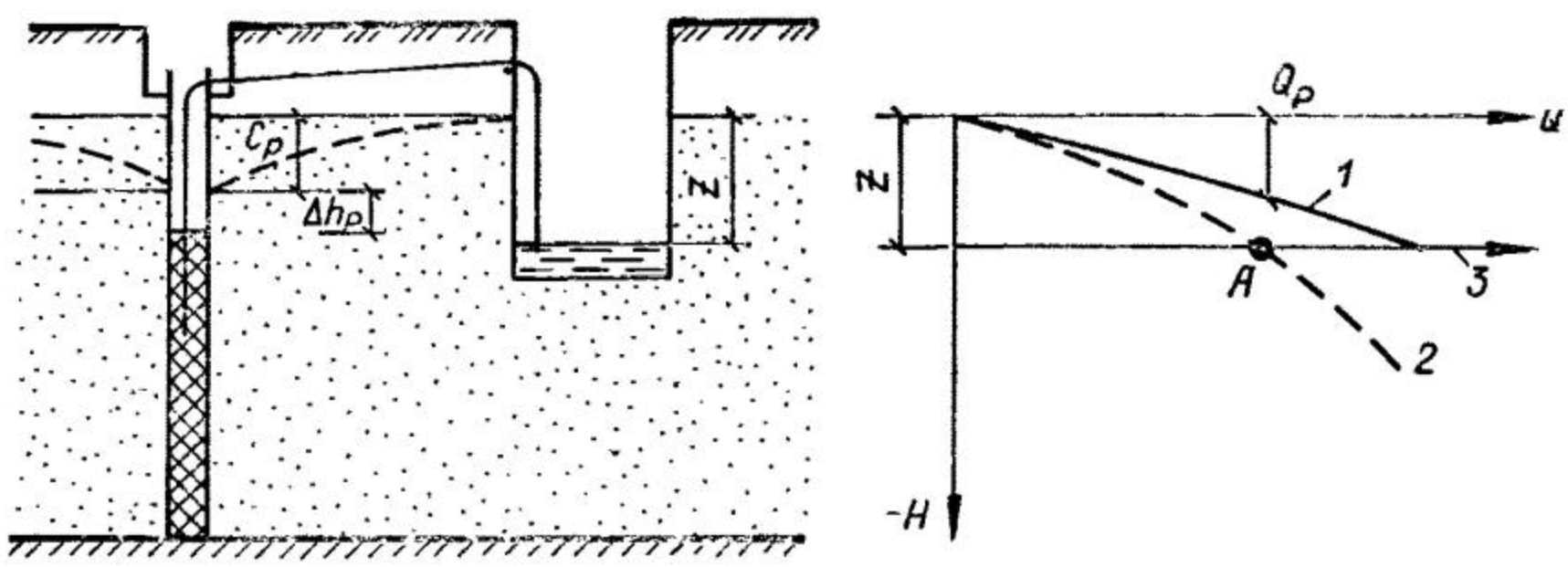


Рис. 7.4. Схема к расчету скважин при сифонном водоотборе

точки $Д'$ определяется расход скважины Q'' с учетом дросселирования напора насоса на величину $(zH)'$, а абсциссой точки B'' — расход скважины Q' при $(zH')=0$. Как видно из графиков, введение в действие установок ИВПВ без замены водоподъемного оборудования скважин будет всегда приводить к занижению η.

В артезианских бассейнах уровни подземных вод могут находиться на отметках, превышающих отметки подачи воды потребителю. Это позволяет на начальном этапе осуществлять эксплуатацию скважин в режиме самоизлива и лишь по истечении определенного времени переходить на откачку воды насосами. Характерный график изменения во времени напора при действии артезианской скважины в режиме самоизлива с постоянным расходом $Q_т$ представлен на рис. 7.3, *в*. Из него видно, что в течение первых t_1 лет эксплуатации напор на устье скважины находится на отметках выше поверхности земли. Поэтому, если вода от скважины подается в резервуар, расположенный на отметке земли, то временем $t=t_1$ определяется продолжительность работы скважины в режиме самоизлива.

Для обеспечения заданной подачи воды потребителю при $t>t_1$ в скважине следует установить насос; выбирать марку насоса следует с учетом дальнейшей сработки запасов подземных вод. Методика подбора насосных установок на различные периоды времени иллюстрируется на рис. 7.3, *в*, где в координатах $S-t$ представлен график изменения во времени напора подземных вод, а в координатах $Q-H$ — дроссельные характеристики насосов с учетом напора в водоподъемных трубах.

Аналогичным образом выполняют расчет и в случае сифонного отбора воды из скважин. Если, например, имеется одиночная скважина, от которой вода по сифонному водоводу подается в сборный резервуар (рис. 7.4), графоаналитический расчет сводится к выполнению следующих построений. В координатах $Q-H$ строится зависимость $S=\psi(Q)$, т. е. характеристика скважины (кривая *1*). Далее к ординатам характеристики скважины прибавляются значения $\Delta h_в$ — потери напора в водоводе — и прово-

дится линия *3*, отражающая отметку наполнения воды в резервуаре, отсчитанную от статистического горизонта. На перпендикуляре, опущенном из точки *A* пересечения линий *2* и *3*, лежат расчетные значения s_p и Δh_p, соответствующие Q_p.

7.2. Расчет систем подачи воды от скважин

Рассмотрим простейшую схему водозабора в виде линейного ряда скважин, работающих на один сборный водовод (рис. 7.5). Напор, требуемый для подачи воды в количестве Q_n из любой n-й скважины на заданную отметку, составляет

$$H_n = z + s_n + \Delta H_n,$$

где s_n — пониженне уровня воды в любой n-й скважине, определяемое с учетом действия остальных скважин; ΔH — потери напора в водоводе от n-й скважины до точки сбора воды.

$$\Delta H_n = l_e \sum_{i=1}^{n-1} A_i \left(\sum_{j=1}^{N} Q_j - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j\right) + L_0 A_0 \left(\sum_{j=1}^{N} Q_j\right)^2. \qquad (7.6)$$

В скважинах могут быть установлены насосы разных марок. Поэтому исходная система уравнений Q_n для расчета N неизвестных величин принимает вид

$$B_n Q_n^2 + s_n + \Delta H_n - (A_n - z) = \Delta h_n \qquad (7.7)$$

для $n = 1, 2, 3, \ldots N$.

Нелинейная система уравнений (7.7) решается методом последовательных приближений. В качестве первого приближения можно принять $Q_n = Q/N$, где Q — проектная производительность водозабора, и, подставив эти значения в уравнение (7.7), найти Δh_n (где Δh_n — невязки потерь напора по каждому из N уравнений, возникающие из-за того, что принятые значения Q_n не удовлетворяют системе уравнений).

Если условие

$$|\Delta h_n| \leqslant \varepsilon \qquad (7.8)$$

не выполняется, то значение Q_n следует изменить на величину ΔQ_n. Величина поправочного расхода ΔQ_n для каждого n-го уравнения может быть приближенно рассчитана по формуле

$$\Delta Q_n = 0{,}5\Delta h_n \Big/ \left\{ B_n Q_n + l \sum_{i=1}^{n-1} A_i \left(\sum_{j=1}^{N} Q_j - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j\right) + \right.$$

$$\left. + \alpha_0 A_0 \left(\sum_{i=1}^{N} Q_j\right) + \frac{R + \xi_n}{2\pi k m} \right\} \qquad (7.9)$$

и принимается со знаком + или —, соответствующим знаку невязки Δh_n.

Система уравнений (7.7) считается разрешенной, когда в процессе последовательных приближений найдены такие значения

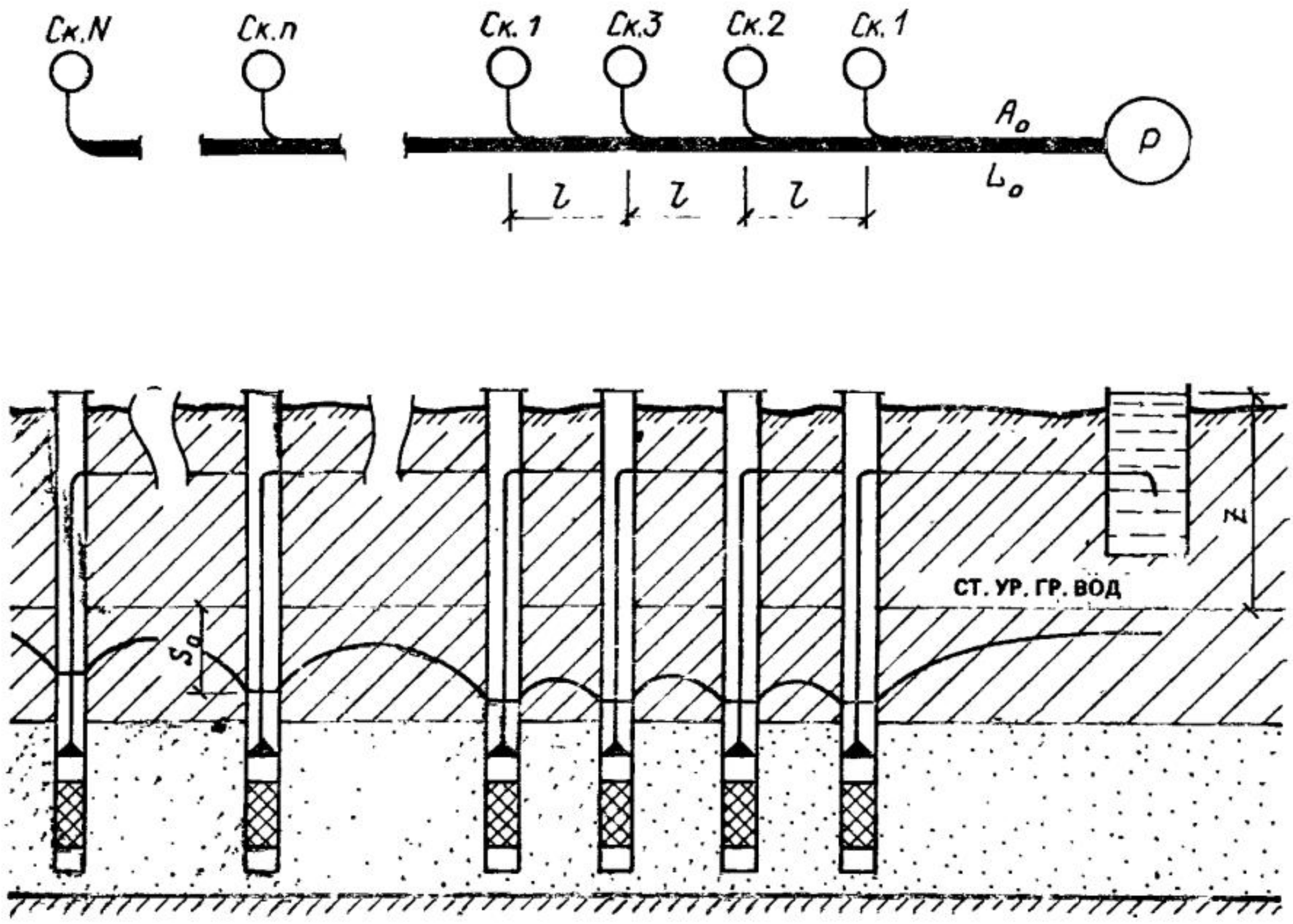


Рис. 7.5. Схема подсоединения скважин линейного ряда к сборному водоводу

Q_n, при которых выполняется условие (7.8). После этого вычисляют s_n:

$$s_n = \frac{Q_n}{2\pi km}(R_{nn} + \xi_{nn}) + \sum_{j=1}^{n}{}^{*} \frac{Q_j}{2\pi km} R_{jh}, \qquad (7.10)$$

где индекс * указывает на то, что из суммы исключен член $j=n$. Кроме этого, определяют величины напоров насосов

$$H_n = z + s_n + \Delta H_n, \qquad (7.11)$$

а также расчетные значения расходов и потерь напора в линиях сети.

Найденные в результате поверочного расчета значения Q_j и s_j могут не удовлетворить ограничениям вида

$$\sum_{j=1}^{N} Q_j \geqslant Q, \quad s_j \leqslant s_{доп}, \quad Q_{min} \leqslant Q_j \leqslant Q_{max}, \qquad (7.12)$$

где Q_{min}, Q_{max} — соответственно минимальный и максимальный расходы установленных в скважинах насосов.

В этом случае необходимо либо произвести замену насосов по скважинам, где не выполняются второе или третье условие (7.12), либо отрегулировать их работу на требуемый режим эксплуатации. Для этого расчет водозаборов проводят в следующем порядке.

Сначала выполняют гидрогеологические расчеты водозаборных сооружений. При этом в зависимости от постановки задачи (обеспечение максимальной или заданной производительности водозабора) учитывают условия работы водозаборных скважин: а) в режиме $s_j = s_{доп}$; б) в режиме $Q_j = \text{const}$ с соблюдением условия $\sum_{j=1}^{N} Q_j = Q$; в) при комбинированном режиме (по пп. *а* и *б*), когда требуется по ряду скважин обеспечить выполнение условий $s_j = s_{доп}$, а по остальным — $Q_j = \text{const}$.

В результате гидрогеологических расчетов определяют величины Q_j по скважинам, действующим в режиме $s_j = s_{доп}$, и в скважинах, которые действуют в режиме $Q_j = \text{const}$. По завершении гидрогеологических расчетов проводят гидравлический расчет системы сбора воды от скважин, в результате которого устанавливаются расходы и потери напора в линиях сети, а также свободные напоры в точках присоединения скважин к сборным водоводам. По известным значениям понижений уровня воды в скважинах и свободных напоров рассчитывают требуемые напоры и подбирают насосы (при необходимости осуществляют их регулирование на заданную подачу воды из каждой скважины). При выполнении расчетов в такой последовательности производительность водоподъемного оборудования будет в точности соответствовать намеченному режиму работы скважин.

При решении подобных задач следует ориентироваться на использование ЭВМ [17].

Пример расчета. Водозабор размещается в пойме реки и представлен шестью водозаборными скважинами (рис. 7.6). Скважины отбирают подземные воды из однородных песков четвертичного возраста. Мощность обводненной толщи песков составляет $M = 20$ м. В основании водоносного горизонта залегают глины, служащие водоупором. Сверху пласт перекрыт песчано-суглинистым слоем мощностью порядка 2,5—3 м. Коэффициент фильтрации пород водоносного горизонта $k_ф = 20$ м/сут. Подземные воды залегают на глубине 2 м от поверхности земли. По своему химическому составу они относятся к гидрокарбонатно-кальциевому типу с повышенным содержанием железа — до 0,5—1 мг/л и склонны к осадкообразованию.

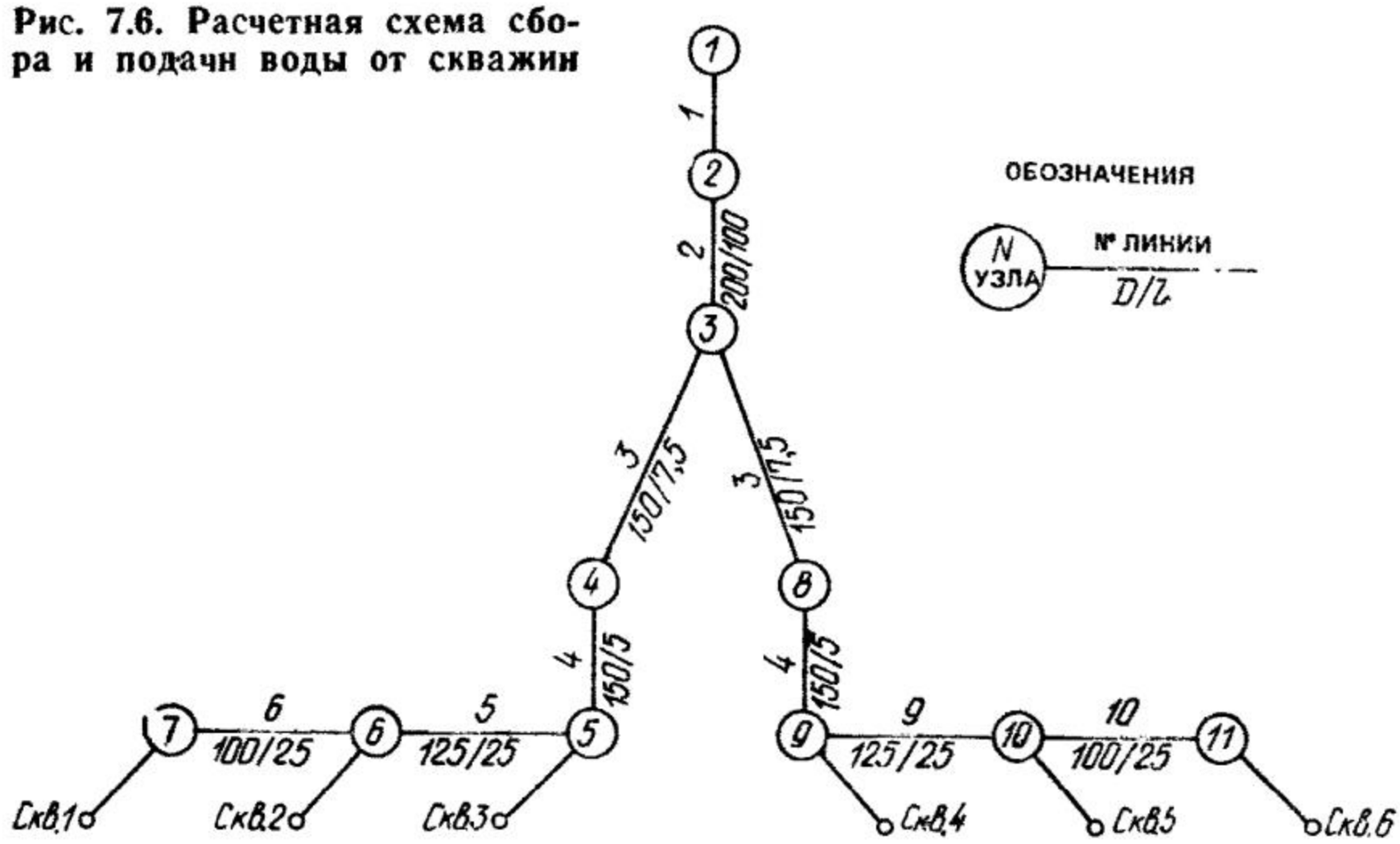
Скважины располагаются вдоль берега реки на расстоянии 25 м от уреза воды. Расстояние между скважинами в ряду также равно 25 м. Все скважины имеют одинаковую конструкцию: радиус бурения $r_c = 0{,}4$ м; радиус фильтра $r_0 = 0{,}2$ м; длина фильтра $l_ф = 30$ м; коэффициент фильтрации пород призабойной зоны $k_ф = 4{,}069$ м/сут.

Инфильтрационный бассейн размещается в центре водозабора на расстоянии 40 м от уреза воды в реке. Длина инфильтрационного бассейна составляет 125 м, а производительность принята равной $Q_б = 0{,}052$ м³/с. Предусмотрено, что вода от скважин должна подаваться в резервуар, расположенный за пределами водозабора. Расчетная отметка наполнения воды в резервуаре находится на 70 м выше статического горизонта.

Рассматриваемая система водоснабжения должна обеспечить подачу воды потребителю Q не менее 100 м³/ч (2400 м³/сут), и при этом понижение уровня воды в скважинах не должно в течение расчетного срока их эксплуатации превысить заданной величины $S_{доп} = 5$ м.

Требуется на основе комплексных расчетов проанализировать режим эксплуатации водозабора с учетом возможного кольматажа скважин (определить

Рис. 7.6. Расчетная схема сбора и подачи воды от скважин



период устойчивой их работы, т. е. время T_s) и осуществить подбор водоподъемного оборудования с его регулировкой на заданную подачу воды.

Сопротивление ξ_k, обусловленное кольматажем водозаборных скважин, рассчитывают по формуле

$$\xi_k(t) = \left(\frac{k}{R(t)} - 1\right) \ln \frac{r_c}{r_0}; \qquad (7.13)$$

$$k(t) = k_ф \left[1 - \frac{N_0}{n_0}(1 - e^{-c_0 \gamma t})\right]^3, \qquad (7.14)$$

где N_0/n_0 — безразмерный параметр (N_0 — предельная емкость фильтра и n — его начальная пористость); $c_0\gamma$ — параметр, характеризующий интенсивность кольматажа скважин (c_0 — концентрация в откачиваемой воде кольматирующих соединений, γ — константа скорости выпадения кольматанта из воды и осаждения его на фильтре скважин).

Для выявления закономерностей изменения производительности отдельных скважин и водозабора в целом гидрогеологические расчеты следует проводить с заданием на скважинах условия $s_j = s_{доп}$. В этом случае найденные значения Q_j скважин соответствуют их максимальной производительности. При выполнении таких расчетов с учетом возрастания ξ_k производительность снижается, и может оказаться, что к некоторому моменту времени она станет равной или даже меньшей, чем Q требуемая.

Для определения периода устойчивой работы скважин гидрогеологические расчеты необходимо выполнять на различные моменты времени с определением на каждом шаге по времени значений Q_j скважин и проверкой выполнения условия $\Sigma Q_i \geqslant Q$. Результаты таких расчетов по 1(6), 2(5) и 3(4) скважинам представлены на рис. 7.7. Там же приведены графики изменения $\xi_k(t)$ и $\Sigma Q_j(t)$. Расчеты выполнены при условии $s_j = 5$ м $(N_0/n_0)_j = 1$ и $c_0\gamma = 0{,}0368$ мес$^{-1}$. Из рисунка видно, что период устойчивой работы системы скважин T_s составляет 18 мес. При $t > T_s$ суммарная подача воды от скважин оказывается меньше требуемой ($Q = 100$ м^3/ч), следовательно, производительность водозабора не обеспечивается.

Следующими этапами комплексных расчетов являются проведение гидравлических расчетов системы сбора воды от скважин и выбор соответствующего водоподъемного оборудования. Такие расчеты следует проводить с использо-

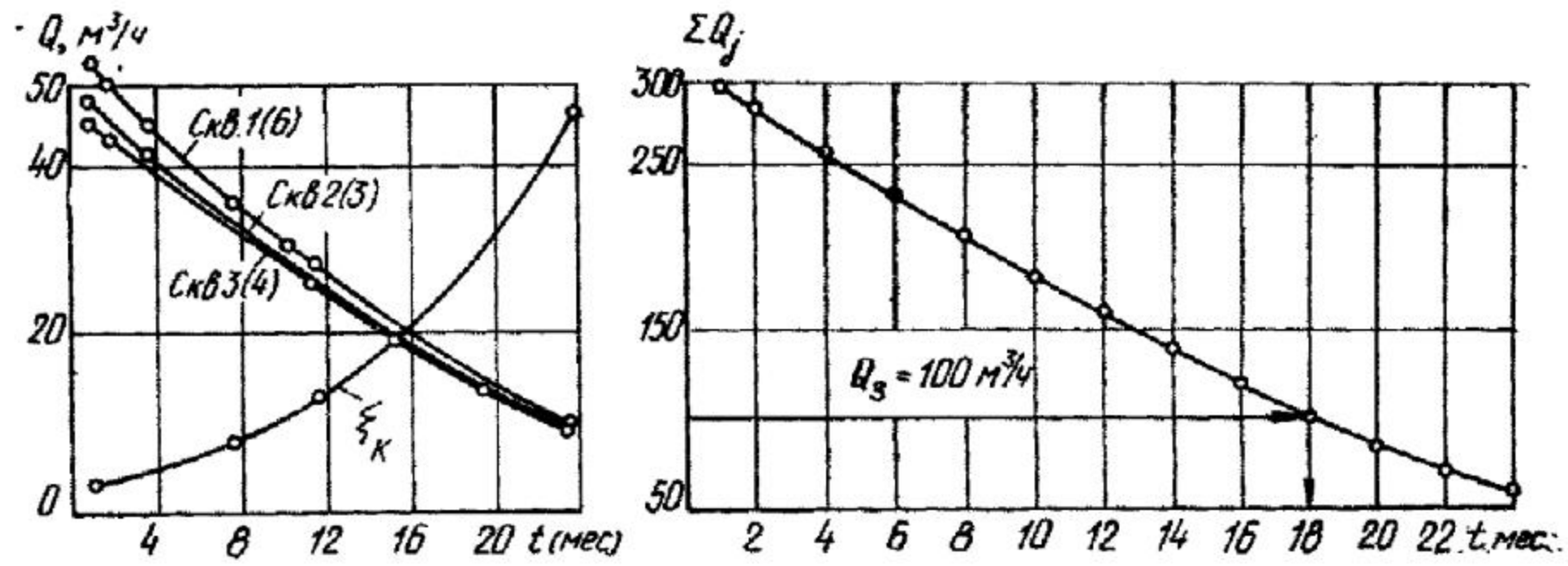
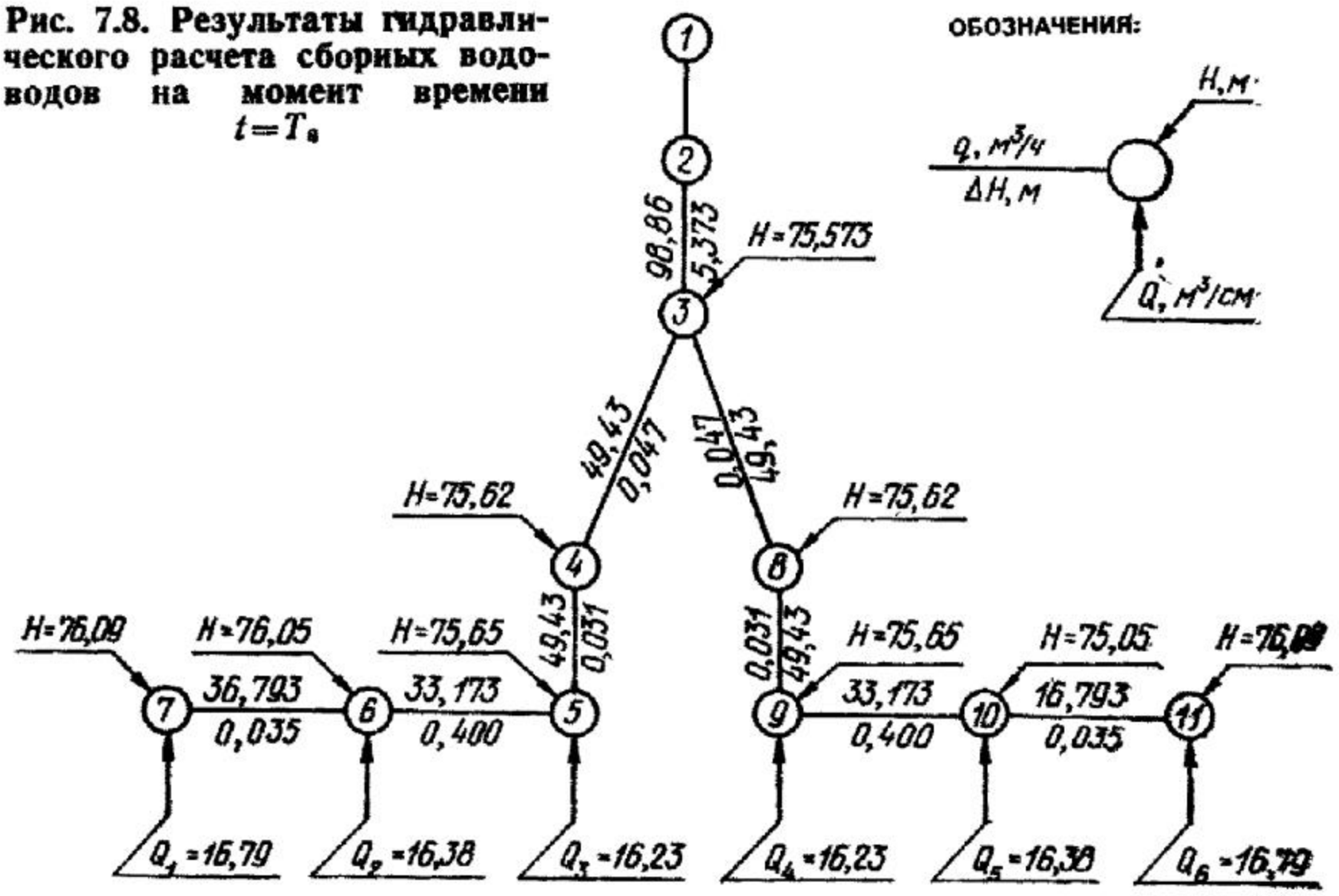


Рис. 7.7. Расчетные графики изменения во времени $\xi_к(t)$, $Q_j(t)$ и $\Sigma Q(t)$ при действии скважин в режиме S_j=const

Рис. 7.8. Результаты гидравлического расчета сборных водоводов на момент времени $t=T_в$



ванием в качестве исходных данных вычисленных значений Q_j и s_j по скважинам на момент времени $t=T_в$.

Результаты гидравлических расчетов сборных водоводов представлены на схеме рис. 7.8, а данные по выбранному водоподъемному оборудованию сведены в таблицу.

Теперь необходимо проанализировать, насколько правильно подобраны погружные скважинные насосы и установлена степень их регулирования (т. е. в состоянии ли обеспечить эти насосы стабильную работу водозабора в течение времени $T_в$). Для этого следует выполнить поверочные расчеты системы сбора и подачи воды от скважин (рис. 7.9, табл. 7.1).

Из данных, представленных на рисунке, видно, что вначале производительность скважин (и их суммарная подача) несколько выше требуемой, а понижение уровней меньше, чем $s_{доп}$. С возрастанием $\xi_k(t)$ производительность скважин Q_j снижается, а s_j увеличивается и к моменту времени $t=T_в$ во всех скважинах s_j оказывается равным $s_{доп}$ и $\Sigma Q_j=Q$.

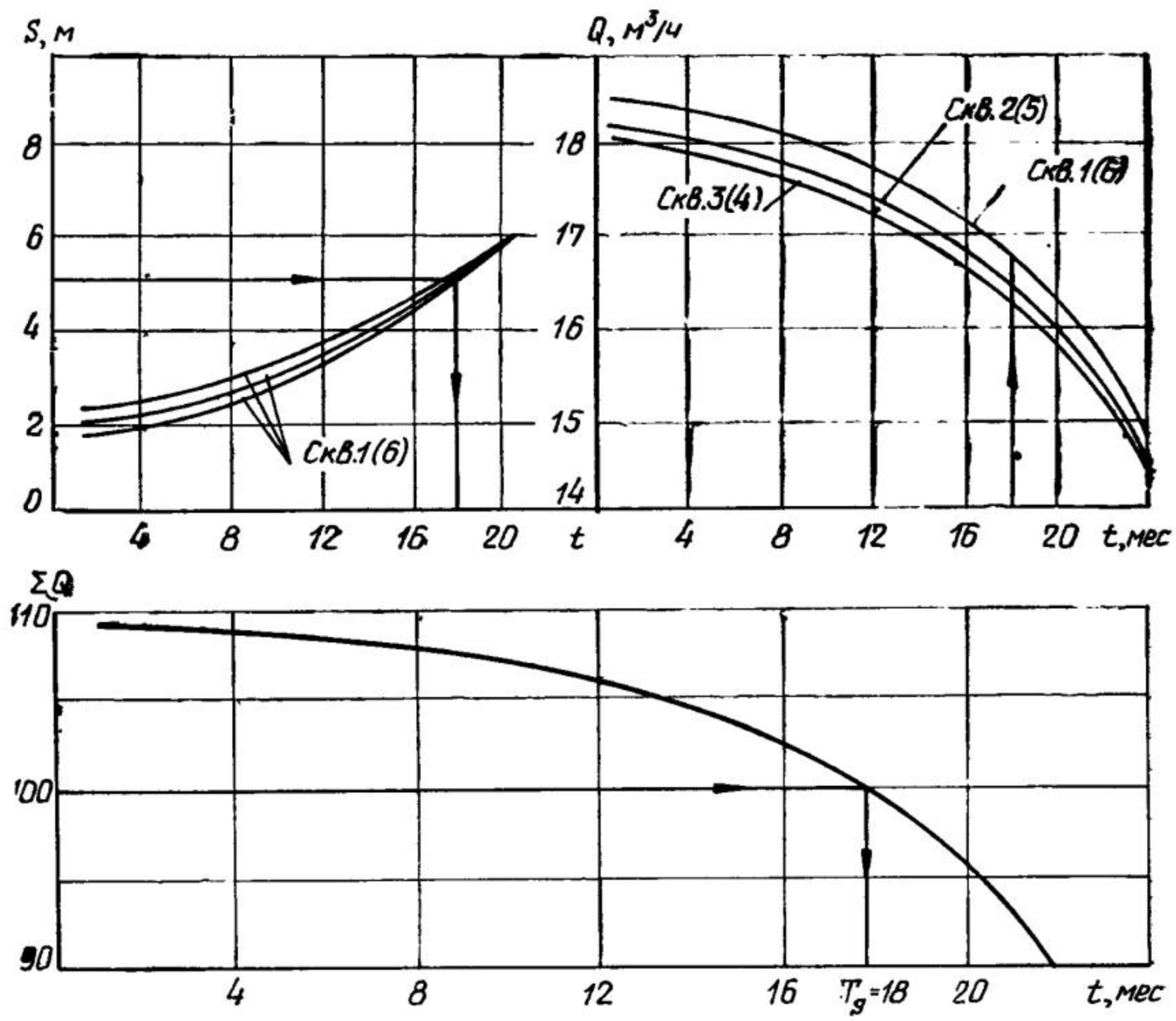


Рис. 7.9. Расчетные значения изменения $S_j(t)$, $Q_j(t)$ и $\Sigma Q_j(t)$ при насосной эксплуатации скважин

Техническая характеристика водоподъемного оборудования

Номер скважины	Q, м³/ч	s, м	Полная высота подъема воды, м	Марка насоса	Напор насоса, м	Дросселируемый напор, м
1	16,79	5	81,09	1ЭЦВ8-25-100	110,81	29,72
2	16,38	5	81,06	1ЭЦВ8-25-100	111,22	30,16
3	16,23	5	80,66	1ЭЦВ8-25-100	111,34	30,68
4	16,23	5	80,66	1ЭЦВ8-25-100	111,34	30,68
5	16,38	5	81,06	1ЭЦВ-25-100	111,22	30,16
6	16,79	5	81,09	1ЭЦВ8-25-100	110,81	29,72

ГЛАВА 8. ШАХТНЫЕ КОЛОДЦЫ

8.1. Способы сооружения шахтных колодцев

Шахтный колодец (рис. 8.1) представляет собой вертикальную выработку, поперечное сечение которой по сравнению со скважинами имеет большие размеры. Применение шахтных колодцев ограничено эксплуатацией водоносных горизонтов, залегающих на сравнительно небольших глубинах — обычно до 20—30 м.

Оголовок колодца предназначен для защиты его от загрязненных поверхностных вод, а также для создания удобных условий для эксплуатации (подъема и разбора воды, наблюдений за состоянием и работой колодца). В местностях с низкими зимними температурами устройство оголовка в сравнительно неглубоких колодцах необходимо также и для предотвращения промерзания воды.

Для предохранения колодца от обрушения и изоляции от загрязнений его стенки укрепляются и образуют ствол. Последний служит связующим звеном между надземной частью (оголовком) и водоприемной частью колодца, а также для размещения в нем водоподъемного оборудования. Возвышение оголовка колодца над поверхностью земли по санитарным условиям принимают не менее 0,8 м. Для предохранения от загрязнений оголовок перекрывают крышкой; над ним устраивают навесы или будки. Вокруг колодца (в земле) укладывают глиняный замóк, а поверхность земли для лучшего отвода воды мостят или асфальтируют с уклоном в сторону от колодца. Оголовок и ствол должны быть непроницаемыми, чтобы поверхностная вода или грунтовая из самых верхних водоносных (неэксплуатируемых) горизонтов не могла проникать в колодец.

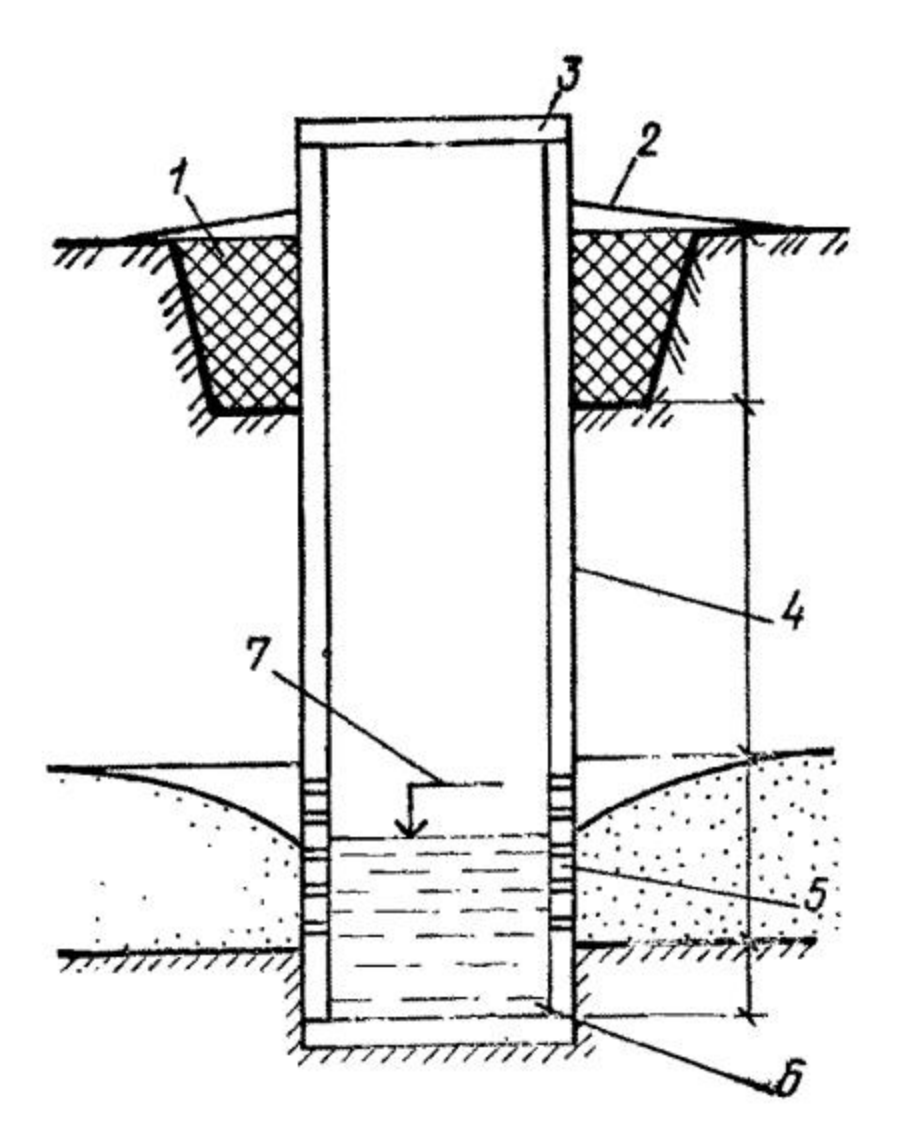
Водоприемную часть шахтных колодцев в зависимости от гидрогеологических условий и глубины устраивают только в дне или стенках или же в дне и стенках колодца. При приеме воды через дно последнее должно быть оборудовано гравийным фильтром или плитой из пористого бетона. При приеме же воды через стенки в них должны быть устроены специальные окна из пористого бетона или окна, заполненные гравийным фильтром. Соотношение средних диаметров частиц в гравийном фильтре и породе рекомендуется принимать 1 : 5.

В зависимости от рода материала, используемого для крепления стенок, существующие конструкции шахтных колодцев могут быть подразделены на деревянные, из каменной и кирпичной кладки, бетонные и железобетонные.

Деревянный срубовый колодец — это простейший и вместе с тем в ряде районов нашей страны наиболее распространенный тип шахтного колодца. К недостаткам его следует отнести недолговечность деревянного крепления и привкус, придаваемый воде

Рис. 8.1. Схема шахтного колодца

1 — глиняный замок; *2* — отсыпка; *3* — оголовок; *4* — ствол; *5* — водоприемная часть; *6* — зумпф; *7* — динамический уровень



древесиной, а также недоброкачественность воды при ее загнивании.

Более долговечны шахтные колодцы из бетона, железобетона, кирпича и камня; эти колодцы в большей степени соответствуют и санитарным требованиям.

В большинстве случаев проходку шахты целесообразно механизировать, так как для механизированной проходки шахтных колодцев уже разработан ряд специальных агрегатов (КШК-25, КШК-30 и др), которые позволяют одновременно выполнять и крепление их стенок железобетонными кольцами. Эти агрегаты могут самостоятельно передвигаться, так как смонтированы на автомашине.

Технические характеристики агрегата КШК-25

Длина, мм	6700
Ширина, мм	2140
Высота, мм	3200
Масса, кг	5250
Диаметр шахты до установки обсадных колец, мм	1230
Наибольшая глубина бурения, м	30
Мощность машины, л. с.	30
Средняя производительность проходки на глубину до 25 м, м²/ч	1—1,15
Расход горючего за 1 ч работы, кг	10
Высота вышки, мм	5500
Число обслуживающего персонала, чел.:	
моторист	1
рабочие	2

При устройстве колодцев глубиной свыше 15—20 м необходима искусственная вентиляция шахты; при наличии вредных газов вентиляция может потребоваться и в более мелких колодцах.

В процессе проходки шахт приходится применять и водоотлив. При небольшом притоке воды водоотлив может быть осуществлен бадьями, а при большом — насосами. В отдельных случаях может быть осуществлено предварительное водопонижение.

В зависимости от состава пород проходку шахты колодцев можно выполнять следующим образом: а) в породах сравнительно прочных, необваливающихся (например, в сухих лессовидных суглинках и плотных глинах, мягких мергелях, мелах, мягких известняках и др. — без временного крепления; б) в породах менее прочных, т. е. не удерживающихся в вертикальной стенке, — с применением временного крепления; в) в породах неустойчивых — с одновременным устройством постояниого крепления.

Для постоянного крепления срубовых колодцев применяют гладкоствольный (несучковатый) лесоматериал, заготовленный заранее, т. е. за 5—6 мес. до его укладки. Наиболее распространена квадратная форма поперечного сечения срубовых колодцев с размерами в свету от 1×1 до 1,5×1,5 м (реже 2×2). Размеры поперечного сечения колодца выбирают исходя из следующих условий: удобства производства работ по отрытию колодца и устройства его водоприемной части, размещения в колодце эксплуатационного оборудования.

В тех случаях, когда необходимо иметь в колодце запас воды, или требуется увеличить его водозахватную способность, или когда это вызвано условиями проходки (например, при прохождении срубом легкооплывающих песков), самую нижнюю часть колодца уширяют, при этом образуется шатер. Шатрам также придают квадратное сечение со сторонами 2...2,5 м при угле наклона шатровой части к вертикали 30—45°.

Сруб в шахту можно устанавливать одним из следующих способов: 1) сборкой заранее приготовленного сруба в шахте, предварительно вырытой на полную глубину; 2) опускным способом с наращиванием венцов сверху; 3) то же, с наращиванием венцов снизу; 4) шатровым способом.

Оголовок колодца представляет собой сруб меньшего сечения (от 0,7×0,7 до 1×1 м), выступающий над поверхностью земли на 0,7—0,8 м, обшитый тесом и снабженный крышкой. При оборудовании колодца для подъема воды воротом устраивают навес, а при применении ручного (или механического) насоса — специальную будку.

Колодцы из каменной или кирпичной кладки — наиболее долговечные водозаборные сооружения, они в большей степени удовлетворяют и санитарным требованиям. Для крепления стенок колодца можно применять крепкий постелистый или штучный камень, не растворяющийся в воде и не окрашивающий ее (например, железистый и кремнистый известняк или песчаник) а также хорошо обожженный кирпич — обыкновенный и лекальный.

Кладку стенок колодца из камня или кирпича выполняют, как правило, на цементном растворе состава 1 : 3 или 1 : 4. Внутренние стен-

ки колодца, а также наружную стенку надземной его части штукатурят цементом. Каменным и кирпичным колодцам обычно придают круглую форму при диаметре в свету 0,75—1,5 м и более. Неглубокие каменные колодцы (до 5—6 м) могут иметь и квадратную форму с размерами в свету от 1×1 до 1,25×1,25 м. Размеры эти зависят от назначения колодца и ожидаемого дебита. Обычно толщина стенок в каменных колодцах бывает 25—80 см. Кирпичные стенки делают не меньше чем в один кирпич.

Оголовок в каменных и кирпичных колодцах часто делают обуженным. Суженную (подземную) и надземную части колодца выполняют из кирпича, бетонных или железобетонных колец. Если же надземная часть колодца имеет тот же диаметр, что и подземная, то оголовок может быть выполнен в каменных колодцах в виде кладки из более массивных камней, а в кирпичных — из той же кирпичной кладки.

Бетонные и железобетонные колодцы наиболее соответствуют санитарным требованиям и могут быть рекомендованы в качестве водозаборных сооружений для питьевого водоснабжения. Во многих случаях этот конструктивный тип колодца, несмотря на высокую строительную стоимость по сравнению с деревянными колодцами, может оказаться наиболее выгодным в технико-экономическом отношении.

Бетонные и железобетонные колодцы бывают трех типов: сплошные с набивкой опалубки, установленной в готовой шахте; из готовых бетонных и железобетонных колец; из готовых бетонных и железобетонных сегментов. В практике водоснабжения в настоящее время применяют главным образом колодцы, закрепленные железобетонными кольцами. Другие типы железобетонных колодцев почти не применяют. Бетонные колодцы устраивают весьма редко — в тех случаях, когда необходимо разместить в шахте насосное оборудование или иметь большой запас воды. Их делают круглыми, диаметром в свету 1,2 м при толщине стенок не менее 12 см.

Наиболее перспективны шахтные колодцы из сборных железобетонных элементов. В типовом проекте для глубин 10, 20 и 30 м шахтные колодцы приняты из сборных железобетонных колец с фальцами высотой 1,05 м и внутренним диаметром 1 м при толщине стенок 8 см (рис. 8.2).

В устойчивых грунтах стык колец в стволе заделывают цементным раствором, а в песчаных грунтах(когда вследствие заклинивания может произойти нависание колонны), применяют специальные конструкции стыка, работающие на разрыв.

Водоприемная часть принята в виде кольца из пористого бетона, армированного такой же сеткой, что и обсадные железобетонные кольца ствола колодца, причем для придания большей прочности в кольцах верхней и нижней частей имеются пояса из бетона. В нижней части колодца укладывают трехслойный обратный фильтр (см. рис. 8.2).

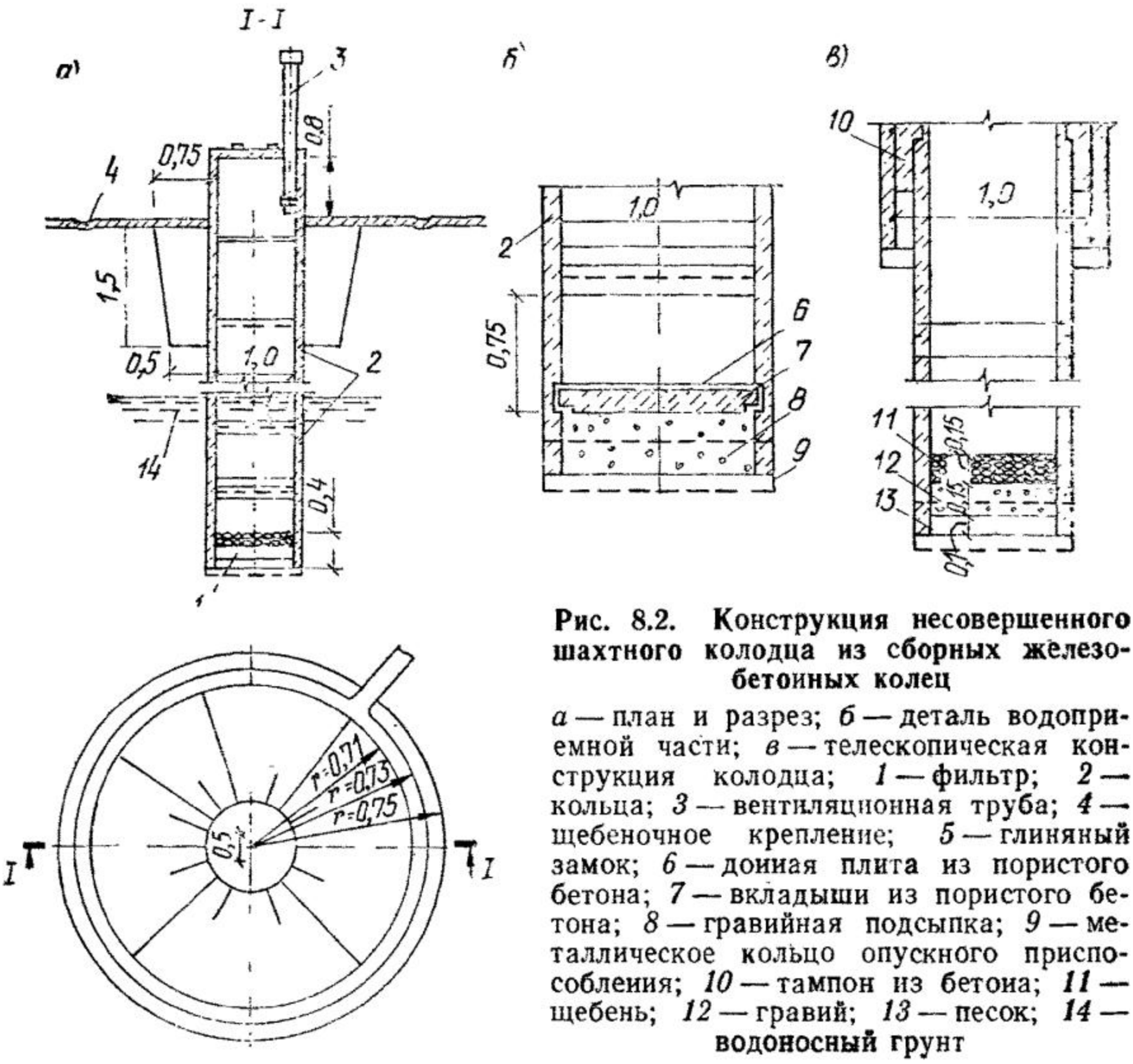


Рис. 8.2. Конструкция несовершенного шахтного колодца из сборных железобетонных колец

а — план и разрез; *б* — деталь водоприемной части; *в* — телескопическая конструкция колодца; *1* — фильтр; *2* — кольца; *3* — вентиляционная труба; *4* — щебеночное крепление; *5* — глиняный замок; *6* — донная плита из пористого бетона; *7* — вкладыши из пористого бетона; *8* — гравийная подсыпка; *9* — металлическое кольцо опускного приспособления; *10* — тампон из бетона; *11* — щебень; *12* — гравий; *13* — песок; *14* — водоносный грунт

При вскрытии забоем колодца песчаных и плывунных грунтов его крепят кольцами диаметром 0,65 м. В этом случае в несовершенных колодцах донный фильтр устраивают в виде бетонной армированной плиты, укладываемой на щебеночно-гравийную обсыпку, толщину которой принимают равной 30 см.

Совершенные колодцы глубиной 20 и 30 м имеют несколько иную конструкцию, включающую зумпф из железобетонных колец. Разработку шахтных колодцев из железобетонных колец можно механизировать при помощи агрегата КШК-25, КШК-30 и др. В связных грунтах диаметр проходки шахты таким агрегатом составляет 1230 мм. В песчаных и плывунных грунтах колодец приходится разрабатывать телескопическим способом, при этом (в случае заклинивания колонны из колец диаметром 1 м) дальнейшую проходку ствола шахты осуществляют буром диаметром 560 мм с уширителем диаметром до 850 мм и закрепляют железобетонными кольцами диаметром 650 мм.

8.2. Расчет дебита шахтных колодцев

При определении дебита шахтных колодцев обычно исходят из стационарного их режима, при этом учитывают: а) схему поступления воды в колодец (через дно, через стенки или одновременно через дно и стенки); б) гидравлическое состояние эксплуатируемого водоносного горизонта (напорное, безнапорное, а в некоторых случаях и смешанное); в) форму поперечного сечения колодца в плане (круглая, квадратная), а иногда и форму его дна (плоская, наиболее распространенная, и полусферическая).

В приводимых ниже формулах принято, что шахтные колодцы имеют круглую форму поперечного сечения в плане. Если необходимо определить дебит колодца квадратной формы, то расчет с достаточной для практики точностью можно выполнять по тем же формулам, но в них нужно заменить величину радиуса колодца r_0 величиной стороны поперечного сечения колодца a, приняв $r = 0{,}6a$.

Приток воды через плоское дно колодца несколько меньше, чем через полусферу. Однако сооружение колодцев с плоским дном значительно проще, чем с полусферическим. Большинство расчетных формул имеют в виду шахтные колодцы с плоским дном, поэтому для обобщения в эти формулы включен коэффициент формы дна колодца α, значение которого принято по Форхгеймеру; для плоского дна $\alpha = 4\pi$, для полусферического — $\alpha = 2\pi$.

Колодцы, работающие дном. Приближенное решение задачи о притоке воды к шахтному колодцу, работающему своим дном, было дано С. К. Абрамовым и В. Д. Бабушкиным. Полученные ими расчетные формулы для определения дебита колодцев имеют следующий вид.

Колодцы, эксплуатирующие напорные воды

Дно колодца плоское:

$$Q = \frac{2\pi k s_0 r_0}{\frac{\pi}{2} + 2\arcsin\frac{r_0}{m + \sqrt{m^2 + r_0^2}} + 0{,}515\,\frac{r_0}{m}\lg\frac{R}{4m}}. \qquad (8.1)$$

При соотношении $r_0/m \leqslant 1/2$ эта формула может быть с достаточной для практики точностью упрощена и приведена к виду:

$$Q = \frac{2\pi k s_0 r_0}{\frac{\pi}{2} + \frac{r_0}{m}\left(1 + 1{,}18\lg\frac{R}{m}\right)}. \qquad (8.2)$$

Дно полусферическое:

$$Q = \frac{\pi k s_0 r_0}{1 + \frac{r_0}{m}\left(1 + 1{,}18\lg\frac{R}{m}\right)} \qquad (8.3)$$

Формулы (8.2) и (8.3) были проверены экспериментально и показали достаточную для практики точность.

Колодцы, эксплуатирующие безнапорные воды

Дно плоское:

$$Q=\frac{2\pi k s_0 r_0}{\frac{\pi}{2}+2\arcsin\frac{r_0}{T+\sqrt{T^2+r_0^2}}+0{,}515\frac{r_0}{T}\lg\frac{R}{4H}}. \qquad (8.4)$$

При соотношении $r_0/T\leqslant 1/2$ формула (8.1) упрощается:

$$Q=\frac{2\pi k s_0 r_0}{\frac{\pi}{2}+\frac{r_0}{T}\left(1+1{,}18\lg\frac{R}{4H}\right)}, \qquad (8.5)$$

где Q — дебит колодца; k — коэффициент фильтрации эксплуатируемого водоносного горизонта; s_0 — понижение уровня воды в колодце (считая от статического, соответственно пьезометрического или свободного); r_0 — радиус колодца; H — мощность безнапорного водоносного горизонта; R — радиус действия колодца; T — расстояние от дна колодца до водоупора.

Колодцы, работающие стенками. Для определения дебита шахтных колодцев, работающих стенками, можно применить формулы Дюпюи, принимающие в данном случае следующий вид:

для напорных вод

$$Q=2{,}73\frac{kms_0}{\lg\frac{R}{r_0}}, \qquad (8.6)$$

для безнапорных вод

$$Q=1{,}37\frac{k(2H-s_0)s_0}{\lg\frac{R}{r_0}}, \qquad (8.7)$$

для смешанных условий (при наличии двух зон — напорной и безнапорной)

$$Q=1{,}37\frac{k(2s_0-m)m}{\lg\frac{R}{r_0}}. \qquad (8.8)$$

Колодцы, работающие одновременно дном и стенками, эксплуатирующие безнапорные воды. Дебит шахтных колодцев, заложенных в безнапорный пласт и работающих стенками и плоским дном одновременно, можно определить путем комбинированного использования формул (8.4) и (8.7). Для этого поток, движущийся выше дна колодца, рассматривается как безнапорный, а поток, поступающий через его дно, — как напорный.

В результате сложения этих двух потоков можно получить формулу для определения дебита колодца, работающего как стенками, так и дном. Эта формула имеет следующий вид:

$$Q = \pi k s_0 \left[\frac{(2h - s_0)}{2{,}3 \lg \frac{R}{r_0}} + \frac{2r_0}{\frac{\pi}{2} + \frac{r_0}{T}\left(1 + 1{,}18 \lg \frac{R}{4T}\right)} \right], \qquad (8.9)$$

где h — высота пониженного уровня подземных вод над дном колодца.

Пример. Определить дебит шахтного колодца, эксплуатирующего безнапорные воды и работающего одновременно стенками и дном.

Задано: $H=6$ м; $k=1$ м/ч; $s_0=1{,}5$ м; $r_0=1$ м; $T=3$ мм; $R=60$ м.

Решение: предварительно определяем $h=H-T=6-3=3$ м. Затем по формуле (8.9) подсчитываем дебит колодца:

$$Q = 3{,}14 \cdot 1 \cdot 1{,}5 \left[\frac{2 \cdot 3 - 1{,}5}{2{,}31 \lg \frac{60}{1}} - \frac{2 \cdot 10}{\frac{3{,}14}{2} + \frac{1}{3}\left(1 + 1{,}18 \lg \frac{60}{4 \cdot 3}\right)} \right] = 7{,}85 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

ГЛАВА 9. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ВОДОЗАБОРЫ

9.1. Конструкции горизонтальных водозаборов

Горизонтальные водозаборы представляют собой водосборную траншею или водосборную галерею, оборудованную для приема воды из водоносного пласта и отвода воды в место расположения водоразборных устройств. Водозаборное сооружение горизонтального типа состоит из водоприемной и водоотводящей (водопроводящей) частей, смотровых и вентиляционных колодцев, расположенных на линии водозабора и водосборного резервуара. Горизонтальные водозаборы эффективны в тех случаях, когда необходимо перехватить широкий поток подземных вод при небольшой его мощности (например, при использовании подземных вод аллювиальных отложений в речных долинах).

Водоприемная часть служит для приема воды из водоносного пласта, для чего поверхность ее снабжается отверстиями и песчано-гравийным фильтром (в случае забора воды из песчаных пород). Этой части придают некоторый уклон, благодаря которому вода самотеком стекает в направлении развития водозабора (в пределах водоприемной части вода заполняет лишь часть его сечения).

Водоотводящую часть делают глухой, она также имеет уклон, но может работать полным сечением. В некоторых водозаборах

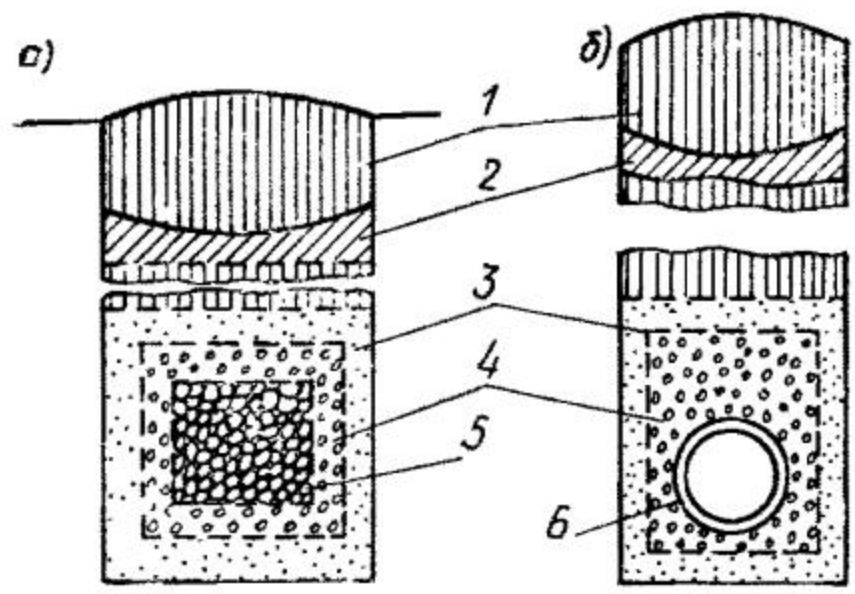


Рис. 9.1. Траншейные водозаборы

а — каменно-щебенчатого типа; *б* — трубчатого типа: *1* — обратная засыпка траншеи местным грунтом; *2* — глина; *3* — крупно-зернистые пески; *4* — гравий; *5* — рваный камень; *6* — дренажная труба

водоотводящая часть отсутствует, тогда вода непосредственно из водоприемной части поступает в водосборный резервуар.

Для осмотра вентиляции и ремонта в процессе эксплуатации водозабор в пределах водоприемной и водоотводящей частей снабжают смотровыми колодцами. Из водосборного резервуара вода самотеком или при помощи насосов поступает в водопроводные сооружения.

В конструктивном отношении горизонтальные водозаборы подразделяются на траншейные (каменно-щебенчатые и трубчатые), галерейные (водосборные галереи и штольни) и кяризы.

Каменно-щебенчатые водозаборы (рис. 9.1, *а*) — наименее совершенные сооружения. Их применяют лишь при захвате подземных вод на глубине 2—3 м от поверхности земли и преимущественно для временного водоснабжения. В нижней части траншеи укладывают фильтрующий материал, размер которого увеличивается к середине траншеи, например щебенку (в центре), гравий и песок (по внешнему контуру).

Применяемые для фильтрующих обсыпок материалы (пески, гравий, галька и щебень) перед укладкой должны быть пропущены через соответствующие грохоты (сетки) для отбора частиц необходимой крупности. При наличии в гравии, а особенно в песках примесей (илистых, глинистых или пылеватых частиц) рекомендуется предварительная промывка их водой. Следует также отметить, что каменно-щебенчатое заполнение траншеи не должно растворяться под действием воды, а потому карбонатные (мел, слабый известняк и т. д.) и гипсоносные породы для этой цели непригодны. Глубину траншеи назначают с учетом гидрогеологических условий, то есть глубины залегания и мощности подлежащего эксплуатации водоносного горизонта. Высоту фильтрующей обсыпки практически принимают в пределах 0,3—0,4H (где H — вскрытая мощность водоносного пласта). Толщину фильтрующих слоев принимают 100—150 мм для каждого слоя (бо́льшие значения — для слоев с крупным материалом). Ширину траншеи устанавливают исходя из конструктивных особенностей водозабора (число и толщина слоев) и условий производства работ: она обычно составляет 0,8—1,2 м.

Трубчатые водозаборы (рис. 9.1, *б*) — более капитальный тип водозаборного сооружения; их можно применять при глубине залегания подземных вод до 4—5 м. От каменно-щебенчатых трубчатые водозаборы отличаются тем, что внизу траншеи, также заполненной фильтрующим материалом, для более свободного стока укладывают дренажные трубы (керамические, асбестоцементные, бетонные, железобетонные). В последние годы начинают использовать также трубофильтры из пористого материала (бетона, полимербетона), которые упрощают конструкцию водозабора (они позволяют или полностью отказаться от фильтрующих обсыпок или же ограничиться укладкой одного слоя).

В типовом проекте Гипроводхоза разработаны конструкции горизонтальных водозаборов трубчатого типа для двухстороннего (рис. 9.2) и одностороннего притока к ним подземных вод. Они состоят из дренажной асбестоцементной трубы диаметром 150 мм, смотровых колодцев, располагаемых через 50 м, и одного сборного колодца. Вокруг трубы устраивают фильтр из промытого гравия или щебня. Глубина заложенных труб принята 3—4 м, уклон 0,009, котлован под колодцы и траншею разрабатывается экскаватором, оборудованным драглайном.

Водосборные галереи устраивают открытым способом: вначале разрабатывают траншею, а затем на ее дне возводят галерею, обычно проходную или полупроходную. Поперечное сечение таких галерей принимают круглым или прямоугольным, причем их обделку обычно выполняют из сборных железобетонных элементов. Разработаны также конструкции водосборных галерей с водоприемными элементами из пористого бетона (рис. 9.3). Применение водосборных галерей ограничено глубиной залегания подземных вод не свыше 6—8 м, так как большая глубина резко усложняет производство работ и увеличивает их стоимость.

При больших глубинах следует переходить на **водосборные штольни**, глубина которых не лимитируется. Их в отличие от галерей осуществляют подземным (туннельным) способом. Фильтрующие элементы могут быть уложены только в пределах обделки.

При устройстве горизонтальных водозаборов для перехвата подрусловых подземных вод их также располагают нормально к направлению их движния, т. е. наиболее часто поперек речных долин. При использовании инфильтрационных вод горизонтальные водозаборы располагают параллельно береговой линии водоема или водотока.

Кяризы — это оригинальные сооружения, довольно широко распространенные в полупустынях (маловодных местностях), предгорных районах Средней Азии, Закавказья и др. Они служат для получения воды и ее вывода самотеком на поверхность земли из сравнительно глубоко залегающих водоносных пластов. При помощи кяризов часто удается получить требуемое количество во-

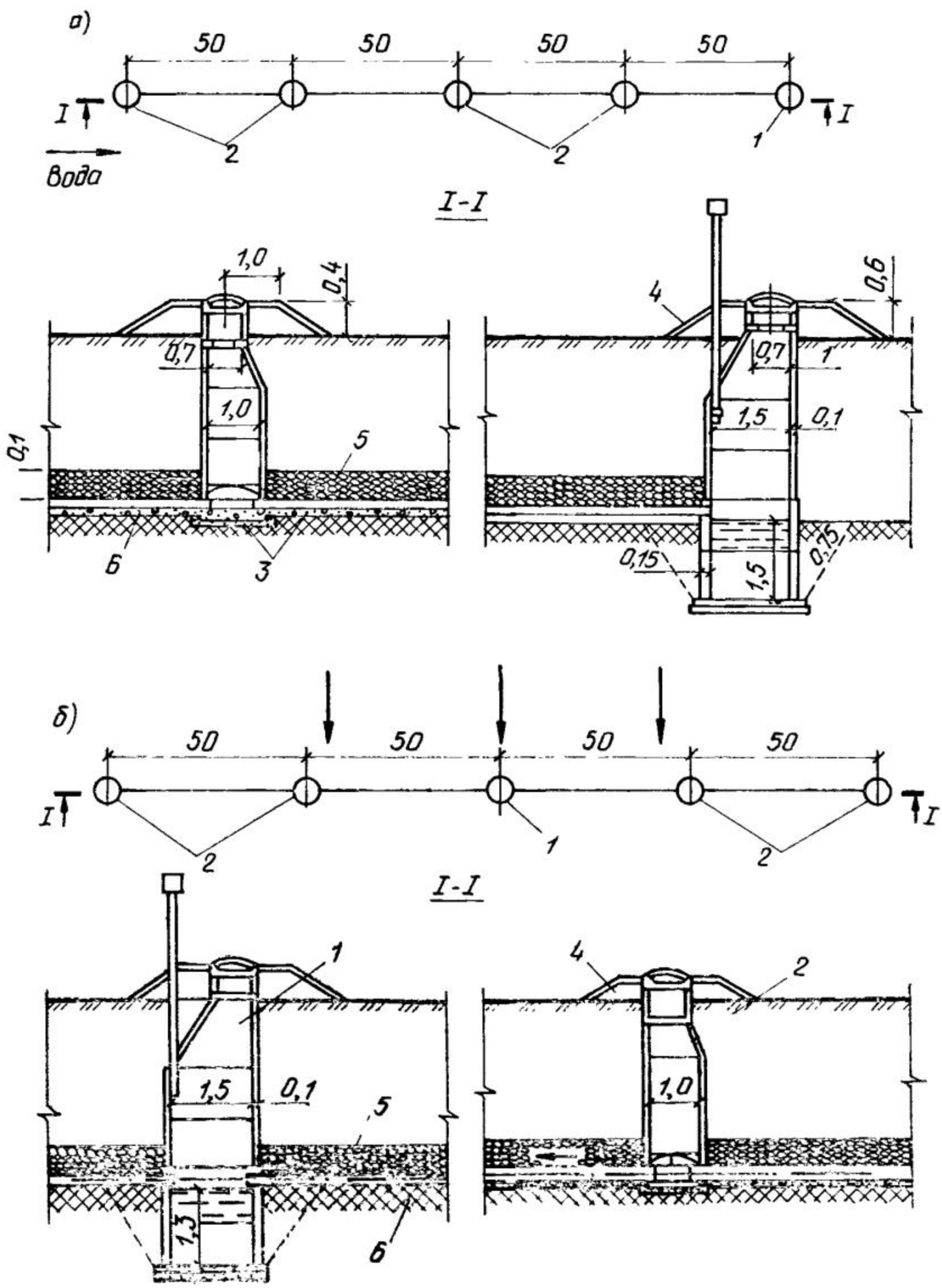


Рис. 9.2. Конструкции горизонтальных водозаборов трубчатого типа

а — расположенные вдоль по потоку; *б* — расположенные нормально к потоку: *1* — сборный колодец; *2* — смотровые колодцы; *3* — щебень, втрамбованный в грунт; *4* — одерновка; *5* — фильтрующая обсыпка; *6* — водоупорный пласт

ды из обводненных трещиноватых глин или глинистых отложений, содержащих небольшие прослои водоносных песков.

Кяриз представляет собой ряд шахтных колодцев-шурфов, пройденных до водоносных пород, между которыми подземным способом (штольнями малого сечения) проходят водосборные га-

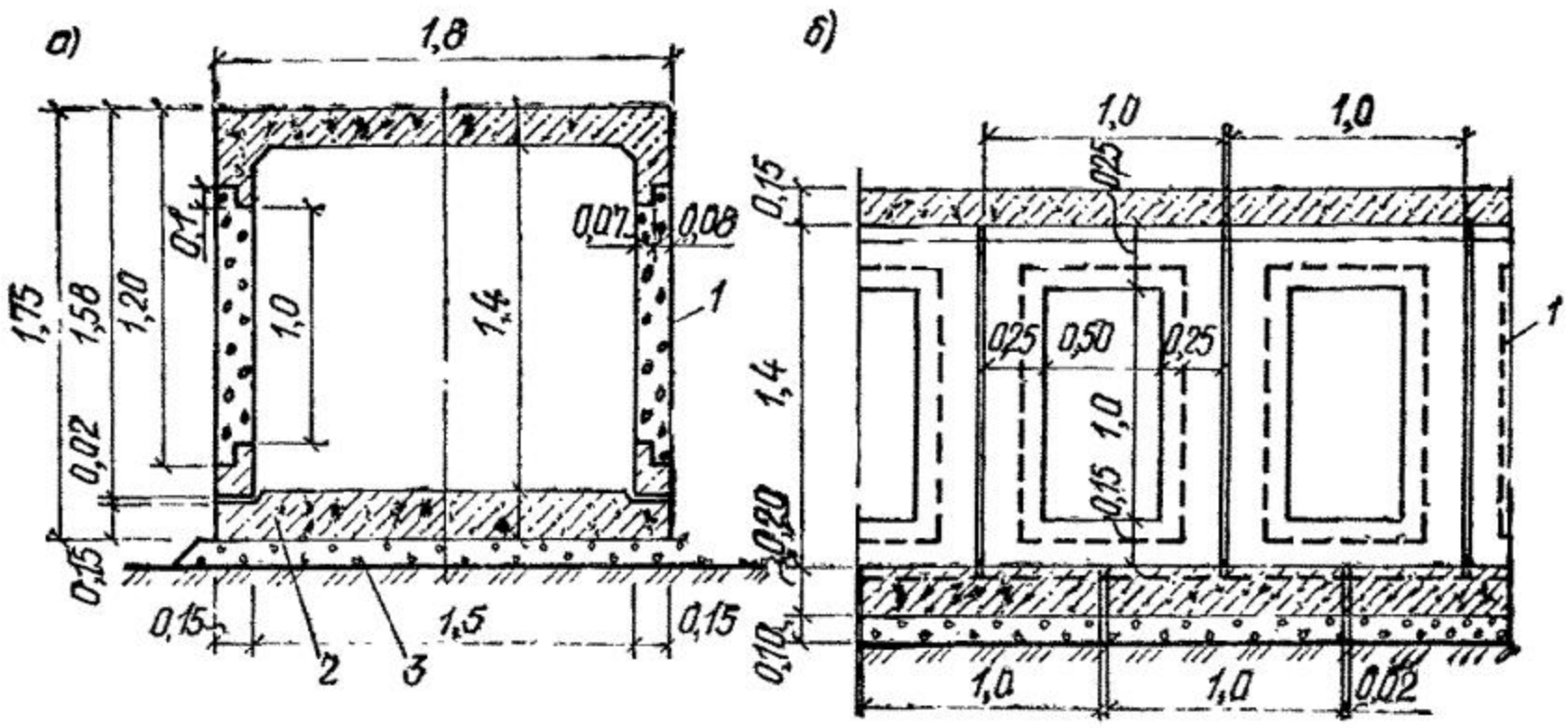


Рис. 9.3. Водосборная галерея с пористобетонными водоприемными элементами
а — поперечный разрез; *б* — продольный разрез: *1* — пористобетонная вставка; *2* — железобетонная плита толщиной 20 см; *3* — щебеночная подготовка

лереи непосредственно в водоносном слое. В практике строительства кяризов колодцы обычно выполняют роль разведочных шурфов, при помощи которых, с одной стороны, выясняют водоносность пород и условия их залегания, а с другой — через них поднимают породу, вынимаемую при проходке штольни, а в случае необходимости спускают крепежный материал. Вместе с тем эти колодцы, располагаемые обычно на расстоянии 5—50 м один от другого (чем устойчивее породы, тем реже), одновременно служат и для вентиляции (глубина колодцев часто достигает 50 м и более).

Практикой установлен следующий порядок сооружения кяризов: сначала проходят колодцы-шурфы, а после выяснения положения водоносных пород между колодцами проходят водосборные галереи. Галерею располагают таким образом, чтобы она одной своей половиной входила в водоносный слой и каптировала его, а другой проходила бы в водонепроницаемых породах и служила путями выхода каптированной воды на дневную поверхность. В устойчивых породах крепление штольни в кяризах обычно не предусматривают; в обваливающихся же породах применяют деревянное крепление сплошными вязаными рамами при высоте их 1 — 1,2 м и ширине 0,5 — 0,6 м.

Для двухпластовых систем с верхним безнапорным и нижним напорным водоносными горизонтами подземных вод целесообразно применение комбинированного горизонтального водозабора с вертикальными скважинами, пройденными в нижний пласт. При этом горизонтальная дрена играет роль водосборного коллектора и одновременно для скважин — водоотводного элемента. С этой целью к горизонтальной трубчатой дрене подключены патрубки фильтровых скважин. Устья скважин совмещают со смотровыми колодцами и оборудуют задвижками.

Горизонтальная дрена каптирует верхний безнапорный водоносный пласт, а скважины — нижележащий напорный горизонт подземных вод.

Водозабор сооружают с предварительным бурением скважин на нижний водоносный слой и установкой задвижек на устьях скважин. После прокладки в траншеях горизонтальных дрен осуществляется врезка в них (снизу или сбоку) патрубков скважин.

Смотровые колодцы и водосборные резервуары. Для осмотра, вентиляции и ремонта горизонтальных водозаборов устраивают смотровые колодцы, которые располагают через 50—75 м в водозаборах трубчатого типа и через 100—150 м — в водозаборах галерейного типа. Кроме того, смотровые колодцы должны быть устроены на участке водозабора при изменении его направления в плане, перегибах профиля и в местах устройства перепадов, а также в начале водозабора (в верхней его части).

В кяризах смотровые колодцы не устраивают, так как их функции могут выполнять шахтные колодцы, располагаемые на сравнительно небольших расстояниях один от другого. В каменно-щебенчатых водозаборах смотровые колодцы также не предусматривают. В водозаборах трубчатого типа смотровые колодцы делают круглой формы, обычно из бетонных или железобетонных колец внутренним диаметром 0,75—1 м. В водозаборах галерейного типа смотровые колодцы можно устраивать как круглой, так и квадратной формы; их выполняют обычно из бетона или железобетона. Размеры колодцев определяются конструкцией и размерами галереи или штольни, с которыми они сопрягаются.

Каждый горизонтальный водозабор заканчивается водосборным резервуаром, в который вода поступает самотеком: из резервуара в водоразборные устройства вода может подаваться самотеком или насосами.

Водосборные резервуары при небольшом заглублении их в землю (до 5—6 м) устраивают квадратной или прямоугольной формы, а при большом заглублении — круглой. Необходимые размеры их определяются дебитом водозабора и требуемой величиной водозабора.

9.2. Трассирование горизонтальных водозаборов

Горизонтальные водозаборы наиболее часто устраивают на коренных склонах; как правило, их располагают нормально к движению подземных вод, обычно в виде вытянутой по простиранию потока одной сплошной или нескольких прерывистых линий.

Не всегда целесообразно развивать горизонтальный водозабор по одной линии; иногда удобно и экономично построить водозабор, состоящий из отдельных участков, расположенных в наиболее благоприятных в гидрогеологическом отношении местах и объединенных в общую систему при помощи водоотводящих линий, подводящих воду в единый водосборный резервуар.

В кяризах, устраиваемых в предгорьях, линию водозабора располагают нормально к склону, т. е. по потоку подземных вод. При заложении водозабора на водораздельных участках или на участках с замедленным движением подземных вод направление водозаборных линий может быть принято любым, удобным для производства работ.

Сопряжение отдельных линий горизонтального водозабора в плане осуществляется в смотровых колодцах. Горизонтальному водозабору следует придавать уклон, направленный к водосборному резервуару. Уклоны надо трассировать таким образом, чтобы скорости движения воды по направлению к резервуару возрастали. Это предохраняет водозабор от заиления наносами благодаря выпадению взвешенных в воде частиц, при этом особое значение имеют минимальные уклоны.

Уклоны устанавливают гидравлическим расчетом. В качестве ориентира можно рекомендовать следующие значения минимальных уклонов: для каменно-щебенчатых водозаборов $I_{min}=0{,}01$; для трубчатых водозаборов $I_{min}=0{,}002$; для галерейных водозаборов $I_{min}=0{,}005$. При заложении дна водозаборов в самом водоносном пласте трассирование значительно облегчается, выбор уклона определяется только гидравлическими условиями.

9.3. Определение дебита горизонтальных водозаборов

Горизонтальные водозаборы чаще всего устраивают в виде одиночной (не взаимодействующей с другими) линии, расположенной нормально к движению подземных вод. Значительно реже эти линии располагают вдоль по течению потока подземных вод (например, при устройстве кяризов). В зависимости от условия заложения горизонтальных водозаборов по отношению к водоупору различают водозаборы совершенные, лежащие своим основанием на водоупоре, и водозаборы несовершенные, не достигающие водоупора.

Наиболее часто горизонтальные водозаборы применяют для эксплуатации безнапорных подземных вод, но в некоторых случаях их можно использовать и при эксплуатации напорных водоносных горизонтов, при этом расчеты проводят главным образом в условиях их стационарного режима. Дебит горизонтального совершенного водозабора, заложенного в безнапорный водоносный пласт и принимающего воду только с одной стороны (случай расположения водозабора нормально к потоку подземных вод), можно определить по формуле Дюпюи

$$Q = Lk\frac{H^2 - h^2}{2R}, \qquad (9.1)$$

где Q — дебит водозабора; L — его длина; k — коэффициент фильтрации водоносного пласта; H — его мощность; h — глубина наполнения водозабора водой; R — радиус действия водозабора.

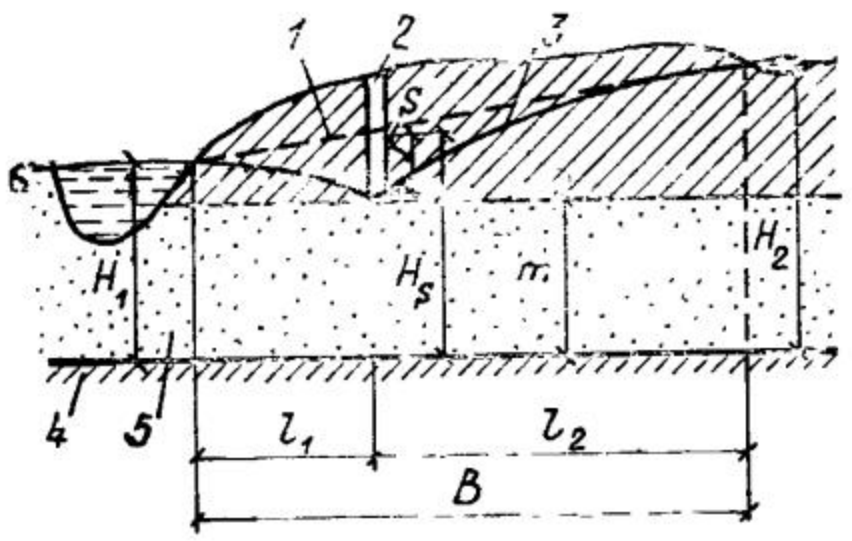


Рис. 9.4. Расчетная схема притока воды к горизонтальному несовершенному водозабору, вскрывающему напорный водоносный пласт

1 — статический уровень; *2* — горизонтальный водозабор; *3* — пьезометрическая депрессионная кривая; *4* — водоупор; *5* — водоносный пласт

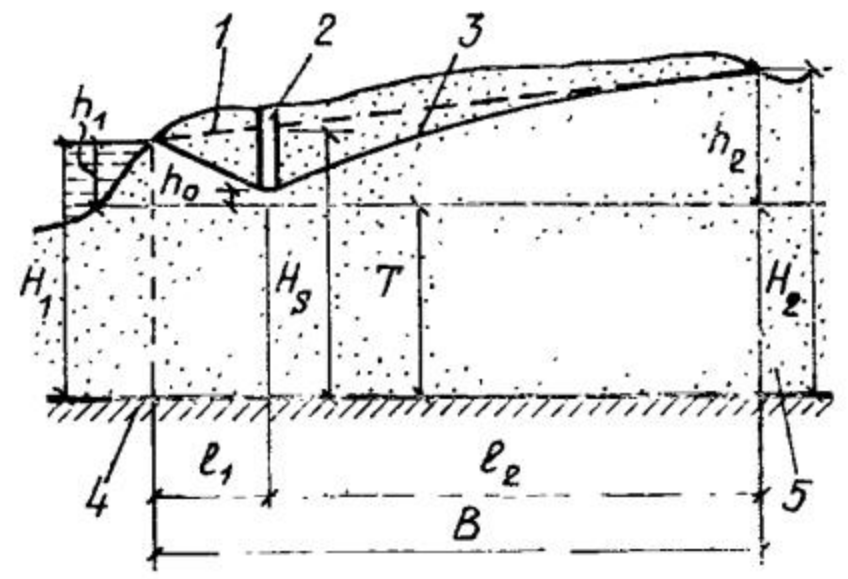


Рис. 9.5. Расчетная схема притока воды к горизонтальному несовершенному водозабору, эксплуатирующему безнапорный водоносный пласт

1 — статический уровень; *2* — горизонтальный водозабор; *3* — депрессионная кривая; *4* — водоупор; *5* — водоносный пласт

При поступлении воды с двух сторон (случай расположения водозабора вдоль по потоку) дебит, определяемый по формуле (9.1), удваивается. Для определения дебита горизонтального несовершенного водозабора можно использовать формулы А. В. Романова. При вскрытии напорного водоносного пласта (рис. 9.4) формула имеет такой вид:

$$Q = \alpha \frac{\pi k s}{\ln \frac{m}{\pi r} + \frac{\pi l_1 l_2}{Bm}}, \tag{9.2}$$

где s — понижение пьезометрического уровня подземных вод при работе водозабора в месте его расположения; m — мощность напорного водоносного пласта; r — радиус водозабора; может быть принят равным $0{,}6b$ (где b — ширина водозабора); l_2 — расстояние от водозабора вверх по потоку до некоторой точки, где водозабор уже не влияет на понижение уровня подземных вод (может быть принято равным $R - iR$, где i — естественный градиент потока подземных вод, а R — радиус действия водозабора); l_1 — расстояние от водозабора, но вниз по потоку (может быть принято равным $R + iR$); $B = l_1 + l_2$.

При расположении водозабора вдоль по потоку в обе стороны от него формируется симметричная депрессионная кривая; в этом случае $l_1 = l_2$.

В случае вскрытия безнапорного водоносного пласта формула имеет следующий вид (рис. 9.5):

$$Q = \alpha (q_1 + q_2 + q_3), \tag{9.3}$$

$$q_1 = \frac{k(h_1^2 - h_0^2)}{2l_1}, \quad q_2 = \frac{k(h_2^2 - h_0^2)}{2l_2},$$

$$q_3 = \frac{\pi k (H_s - h_0 - T)}{\ln (T/\pi r) + \pi l_1 l_2 / TB},$$

$$h_1 = H_1 - T, \quad h_2 = H_2 - T,$$

где H_1 — напор на расстоянии l_1 вниз по потоку; H_2 — напор на расстоянии l_2 вверх по потоку; h_0 — напор воды в водозаборе, считая от условной линии А—Б; T — расстояние от водоупора до той же линии.

При расположении водозабора вдоль по потоку $H_1=H_2$, $h_1=h_2$ и $l_1=l_2=R$.

Тогда формула (9.3) принимает вид

$$Q = L(2q_1 + q_3), \tag{9.4}$$

где $$q_1 = q_2 \frac{k(h_1^2 - h_0^2)}{2R}.$$

В сложных гидрогеологических условиях (неоднородное строение пласта) дебит водозабора рекомендуется определять на основе электромоделирования.

Пример. Определить дебит горизонтального водозабора несовершенного типа, заложенного нормально к безнапорному потоку подземных вод.

Задано: $H_2=10$ м; $H_1=9$ м; $h_0=0$; $l_1=200$ м; $l_2=250$ м; $T=5$ м; $k=1$ м/ч; $L=250$ м.

Решение: предварительно находим $L=200+250=450$ м.

$$H_s = \sqrt{\frac{200}{450}(10^2 - 9^2) + 9^2} = 9{,}45 \text{ м}; \quad h_2 = 10 - 5 = 5 \text{ м}; \quad h_1 = 9 - 5 = 4 \text{ м}.$$

Сначала определяем величины q_1, q_2 и q_3:

$$q_1 = \frac{1(4^2 - 0^2)}{2 \cdot 200} = 0{,}04 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad q_2 = \frac{1(5^2 - 0^2)}{2 \cdot 250} = 0{,}05 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$q_3 = \frac{3{,}14 \cdot 1(9{,}45 - 0 - 5)}{2{,}3 \lg \frac{5}{3{,}14 \cdot 0{,}5} + \frac{3{,}14 \cdot 250 \cdot 200}{5 \cdot 450}} \approx 0{,}2 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Затем по формуле (9.3) находим $Q=250(0{,}04+0{,}05+0{,}2)=72{,}5$ м³/ч.

9.4. Подбор фильтрующих обсыпок для горизонтальных водозаборов

Материалы, предназначенные для фильтрующих обсыпок, должны удовлетворять требованиям прочности и морозостойкости. Гравий и щебень изверженных пород (граниты, сиениты, диориты, габбро, порфиры, липариты, базальты и т. п.) с плотностью 2,3—2,7 т/м³ или же особо прочные разновидности осадочных пород (кремнистые известняки и хорошо сцементированные песчаники) с плотностью 2—2,4 т/м³ при временном сопротивлении на сжатие не менее 600 кг/см² пригодны для внутренних слоев обсыпки.

Для наружных слоев обсыпки пригодны природные пески — продукты выветривания изверженных пород. Фильтрующая обсыпка не должна заиляться, кольматироваться и подвергаться химической суффозии; количество частиц размером $\leqslant 0{,}1$ мм допускается не более 3—5 %. Для подбора состава фильтрующих обсыпок в водозаборах горизонтального типа рекомендуется пользоваться

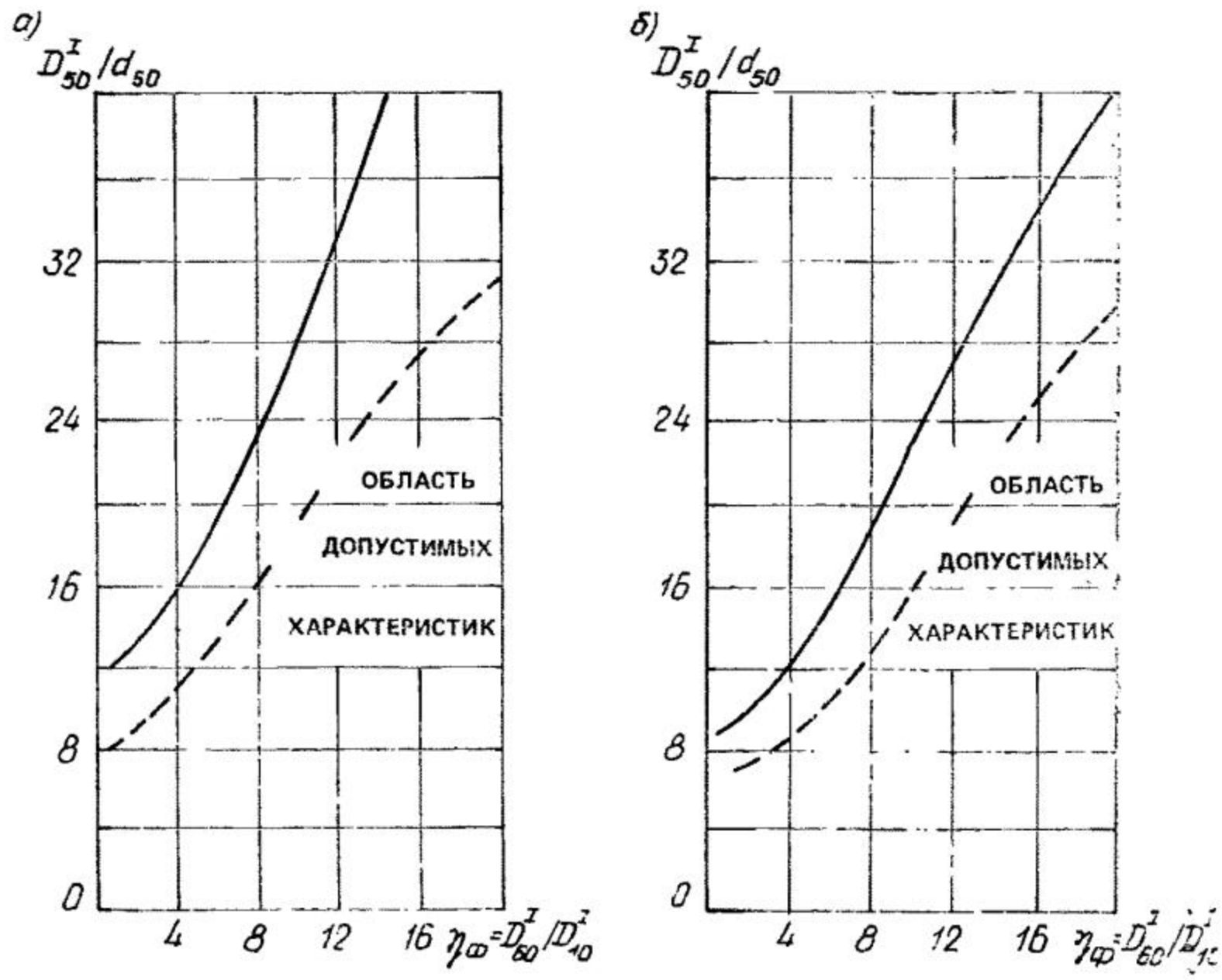


Рис. 9.6. Кривые для подбора состава первого слоя фильтра (схема движения воды сверху вниз)

а — из гравелистых материалов при толщине слоя фильтра $h_{с.ф} \geqslant 8D_{50}$; *б* — из щебенистых материалов при толщине слоя фильтра $h_{с.ф} \geqslant 6D_{50}$

расчетными графиками В. С. Истоминой (ВНИИ ВОДГЕО), составленными применительно к различным схемам движения воды.

В песчаных и гравелистых водоносных породах с коэффициентом неоднородности $\eta_{гр} = d_{60}/d_{10} \leqslant 10$ и средним диаметром $d_{50} > 0{,}15$ мм при движении воды сверху вниз первый слой фильтра следует подбирать, используя графики (рис. 9.6), выражающие зависимости $D'_{50}/d_{50} = f(\eta_ф)$, где сплошной линией проведены осредненные кривые, пунктирными — огибающие. При пользовании сплошными линиями расчет ведется для осредненного состава пород. При пользовании огибающими (пунктирными) линиями подбор и проверку выполняют с запасом. Здесь D'_{50}, d_{50} — средние диаметры частиц для смежных слоев пород (соответственно фильтра и водоносного пласта); D'_{60}, d_{60} — контролирующие диаметры частиц; D'_{10}, d_{10} — действующие диаметры частиц; $\eta_{гр}$ — коэффициент неоднородности водоносного пласта; $\eta_ф$ — коэффициент неоднородности фильтрующей обсыпки (слоя фильтра).

В тех же условиях ($\eta_{гр} \leqslant 10$ и $d_{50} = 0{,}15$—$0{,}7$ мм), но при движении воды снизу вверх, не допуская контактного запора мелкозернистой породы в поры более крупной, первый слой фильтра подбрают по графику, изображенному на рис. 9.7, *а*. При боковой схеме движения воды (т. е. параллельно фильтру), а также отсут-

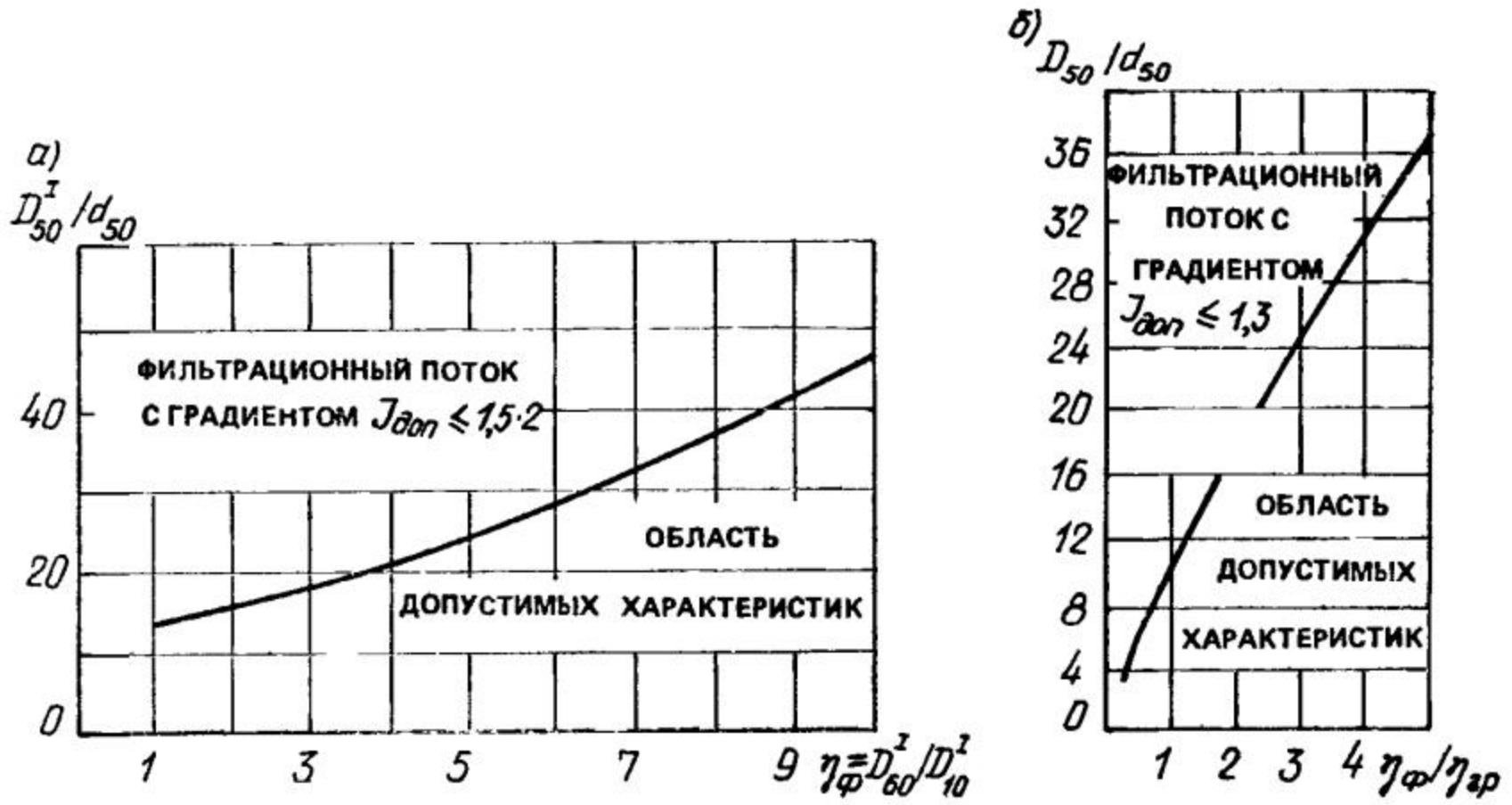


Рис. 9.7. Кривые для подбора состава первого слоя фильтра $D_{60}/D'_{10} \leqslant 10$
а — при движении воды снизу вверх на песчаном основании; *б* — при боковом движении воды при $I \leqslant 1{,}3 d_{60}/d_{10} \leqslant 10$

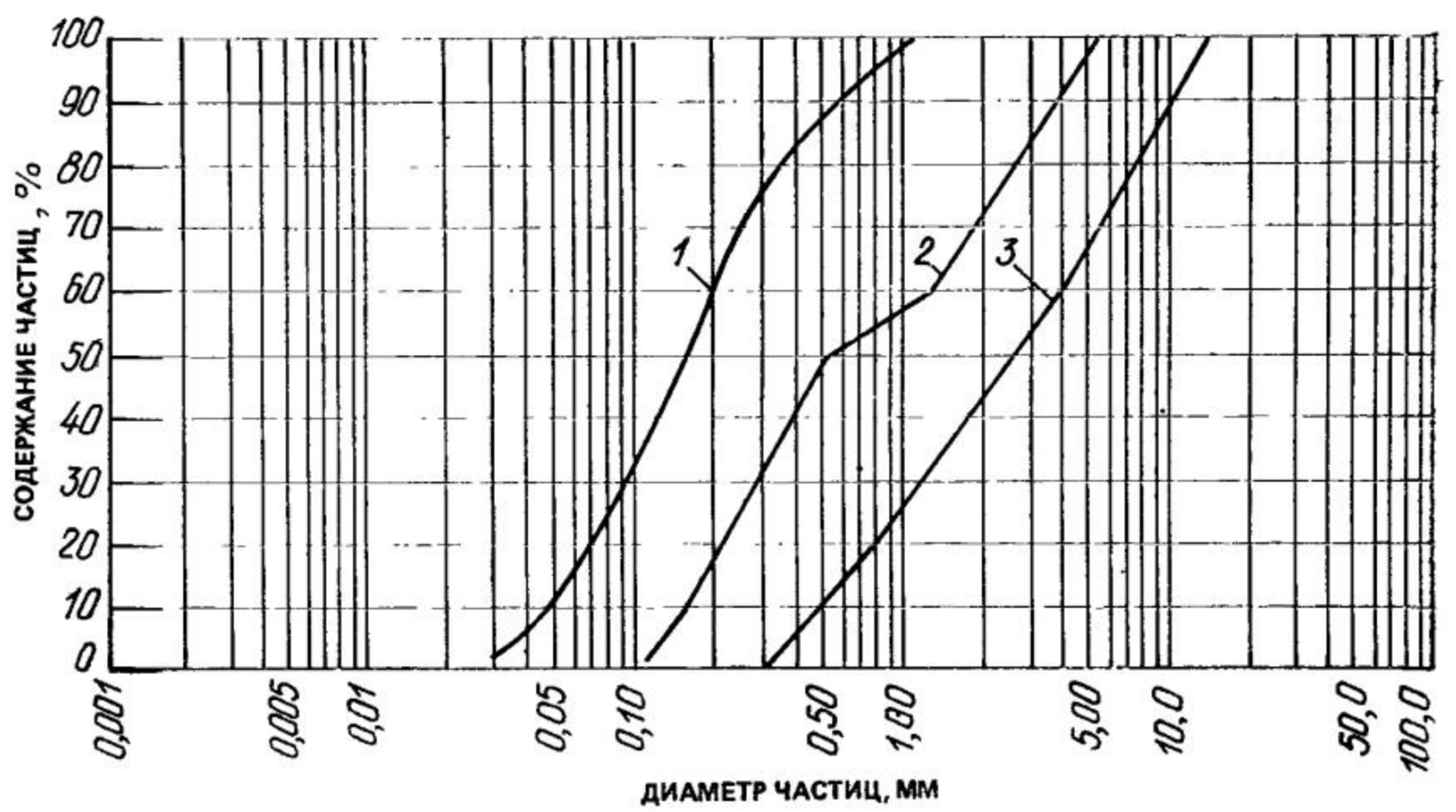


Рис. 9.8. Кривые зернового состава водоносного песчаного пласта (*1*) и фильтра (*2, 3*)

ствии контактного размыва более мелкозернистой породы крупность материалов для водоносных пластов, характеризующихся коэффициентом неоднородности $\eta_{гр} \leqslant 10$ и $d_{50} = 0{,}15—0{,}7$ мм, выбирают по графику, изображенному на рис. 9.7, *б*. Коэффициент неоднородности фильтрующих обсыпок рекомендуется принимать не больше 10, т. е. $\eta_{гр} = 10$.

Для гравелисто-галечниковых водоносных пород с песчаным заполнителем в количестве $g > 10—20$ % по массе, коэффициентом неоднородности $\eta_{гр} = 10—20$ и коэффициентом фильтрации $k <$

$<0{,}05$ м/с первый слой фильтра (как при движении воды сверху вниз, так и снизу вверх) предлагается подбирать, выделяя из водоносного пласта его расчетную фракцию с коэффициентом неоднородности $\eta_{гр}=10$ (считая от мелких частиц). Для этой расчетной части и следует подбирать первый слой фильтра (см. рис. 9.7). Второй и третий слои фильтра подбирают по тем же графикам (см. рис. 9.6, 9.7, *а*), принимая первый слой обсыпки за водоносный пласт.

Толщину слоев фильтра выбирают в пределах $h_ф \geqslant 2D_{50} - 2D_{80}$, но из условий производства работ она не должна быть менее 0,1 м, оптимальное значение — 0,15—0,2 м.

Пример. Водоносный пласт представлен пылеватым песком (рис. 9.8) с $d_{min}=0{,}02$ мм; $d_{10}=0{,}05$ мм; $d_{50}=0{,}17$ мм; $d_{60}=0{,}20$ мм; $d_{max}=1$ мм; $\eta_{гр}d_{60}/d_{10}=4$ (кривая *1*). Подобрать первый слой обсыпки при движении воды сверху вниз.

Принимаем коэффициент неоднородности обсыпки $\eta_ф=D'_{60}/D'_{10}=8$. Отношение D'_{50}/D_{50} можно принять от 3 до 15 (с запасом). Вначале рассчитаем кривую зернового состава обсыпки при $D_{50}/d_{50}=3$. Водоносный пласт имеет $d_{50}=0{,}17$ мм.

Тогда $D'_{50}=0{,}17\cdot3=0{,}51$ мм. Учитывая, что частиц $<0{,}1$ мм в фильтре не должно быть >3 %, принимаем $D'_{10}=0{,}15$ мм, а $D'_{60}=0{,}15\cdot8=1{,}2$ мм. D'_{max} принимаем ~5 мм. Зная D'_{10}, D'_5, D'_{60} и D'_{max}, строим первую граничную кривую зернового состава фильтрующей обсыпки — кривая *2* (см. рис. 9.8).

Подобным образом строим и вторую граничную кривую при $D'_{50}/d_{50}=15$. Определяем $D'_{50}/d_{50}=0{,}17\cdot15=2{,}55$ мм. Тогда D'_{60} принимаем 3,5—4 мм, а $D_{50}=0{,}5$ мм. D'_{max} принимаем 10—15 мм. По полученным значениям D'_{10}, D'_{50}, D'_{60} и D'_{max} строим вторую граничную кривую зернового состава фильтрующей обсыпки — кривая *3* (см. рис. 9.8).

Материалы, соответствующие зерновому составу между кривыми *2* и *3*, можно использовать для первого слоя фильтра при условии, что коэффициент неоднородности их равен 8.

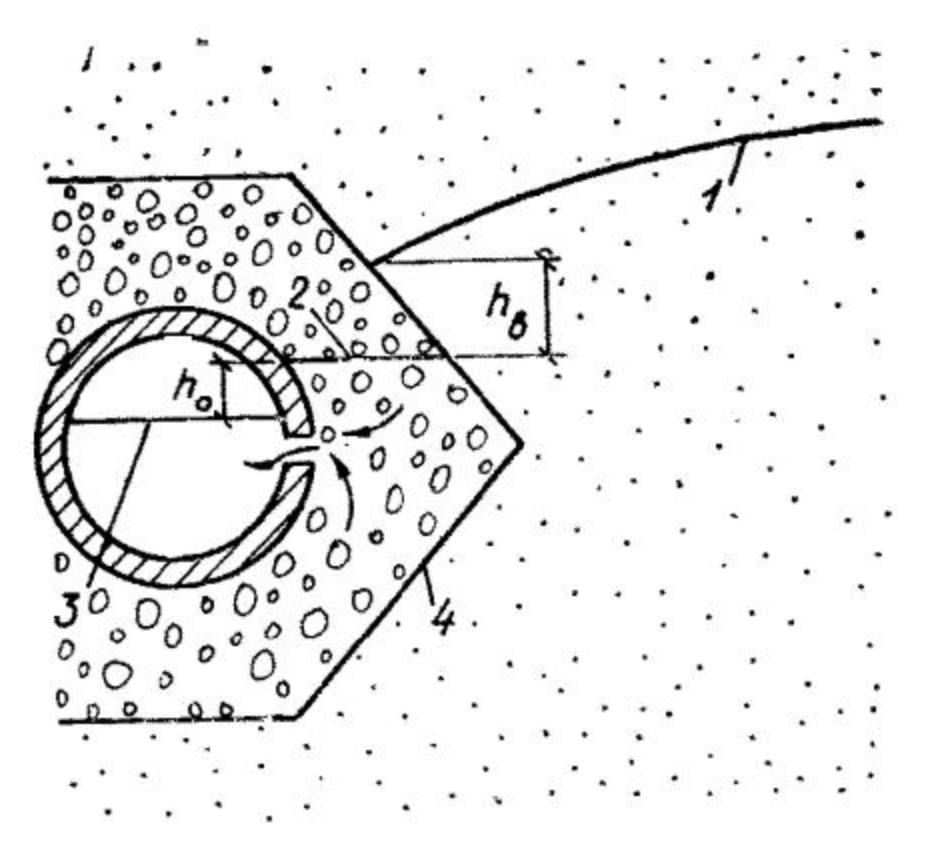
Пригодность имеющегося материала для фильтра проверяют следующим образом. Зная зерновой состав водоносного пласта и карьерного материала, предназначенного для фильтра, определяют отношение D'_{50}/d_{50} и коэффициент неоднородности карьерного материала D'_{60}/D'_{10}; на графике (см. рис. 9.6, *а*) находят точку пересечения. Если эта точка попадает в область допустимых значений, то материал можно использовать для фильтра, в противном случае материал непригоден и нуждается в сортировке.

9.5. Расчет водоприемной поверхности горизонтальных водозаборов трубчатого типа

Водоприемные отверстия в стенках трубы. Диаметр круглых сверленых отверстий принимают не менее 1—1,5 см, ширину щели — не менее 0,5—1 см. В стенках бетонных и железобетонных труб и галереях отверстия выполняют одновременно с изготовлением труб. Для этого в местах размещения отверстий закладывают промасленные деревянные пробки, которые удаляют после схватывания бетона. Диаметр отверстий принимают не менее 2—2,5 см. Необходимое число водоприемных отверстий определяют гидрав-

Рис. 9.9. Схема к гидравлическому расчету водоприемного отверстия трубы

1 — поверхность грунтовых вод в окружающем грунте (кривая депрессии); *2* — уровень воды в фильтрационной обсыпке; *3* — уровень воды в трубе; *4* — контур фильтрующей обсыпки; $h_в$ — участок высачивания на внешнем контуре фильтрующей обсыпки; h_0 — потери напора при истечении воды через водоприемные отверстия



лическим расчетом. При этом различают: а) отверстия, расположенные в верхней или боковой части трубы; б) отверстия, расположенные в донной части трубы.

На рис. 9.9 приведена схема к гидравлическому расчету отверстий, расположенных в верхней или боковой части трубы. Через водоприемное отверстие происходит истечение воды из фильтрующей обсыпки во внутреннюю полость трубы, которое сопровождается некоторыми потерями напора h_0. Задавая допустимую величину этих потерь, можно определить число отверстий на 1 м длины

$$h = \frac{q}{\mu w_0 \sqrt{2gh_0}}, \qquad (9.5)$$

где q — приток к водозабору на 1 м длины (определяется гидрогеологическим расчетом); w_0 — площадь одного отверстия (для вертикальных щелей в расчет принимается площадь отверстия ниже уровня воды в трубе); g — ускорение силы тяжести; μ — коэффициент расхода.

Коэффициент расхода отверстий первого типа (расположенных в верхней или боковой части трубы) определяют в зависимости от числа Рейнольдса и отношения d_{17}/t_0, где t_0 — размер отверстия (диаметр или ширина щели, зазора); d_{17} — размер фракции обсыпки, соответствующий 17 % по кривой расчетного гранулометрического состава (см. таблицу). В расчетный состав включаются фракции крупнее $0{,}4t_0$ — в случае круглых отверстий и $0{,}6t_0$ — в случае щелей или зазоров.

Значения коэффициента расхода

Re	d_{17}/t_0							
	0,4	0,65	1	1,5	2	3	4	6
10^5	0,33	0,27	0,21	0,33	0,4	0,47	0,51	0,55
10^4	0,31	0,25	0,20	0,33	0,4	0,48	0,51	0,55
$5\cdot10^3$	0,28	0,24	0,19	0,32	0,4	0,48	0,52	0,56
$2\cdot10^3$	0,22	0,2	0,17	0,29	0,36	0,35	0,48	0,53

Число Рейнольдса вычисляют по формуле

$$\mathrm{Re}=\frac{t_0\sqrt{2gh_0}}{\nu}, \qquad (9.6)$$

где ν — кинематический коэффициент вязкости, равный 0,0131 см²/с при температуре воды 10° С.

Расчет отверстий второго типа (расположенных в донной части трубы) выполняют: а) по условию предотвращения выноса фильтрующей обсыпки из-под трубы; б) по величине допустимых потерь напора. Из двух полученных значений принимают наибольшее число отверстий.

Условие предотвращения выноса имеет следующий вид:

$$v_0=0{,}2\sqrt{gd_{10}}, \qquad (9.7)$$

где v_0 — скорость потока в отверстии; g — ускорение силы тяжести; d_{10} — размер фракций обсыпки, соответствующий 10 % по кривой ее гранулометрического состава.

Согласно условию (9.7), число донных отверстий на 1 м длины трубы определяют по формуле

$$n\geqslant\frac{q}{w_0\cdot 0{,}2\sqrt{gd_{10}}}. \qquad (9.8)$$

Расчет донных отверстий по величине допустимых потерь напора выполняют по формуле (9.5) с учетом следующих особенностей определения коэффициента расхода:

а) величину d_{17} выбирают из состава грунта, за исключением 10 % мелких фракций, которые могут быть внесены из-под трубы при соблюдении условия (9.7);

б) в случае $d_{17}/t_0<1$ в расчет принимают значение коэффициента расхода при $d_{17}/t_0=1$.

Допустимые потери напора по формуле (9.5) принимают с учетом обеспечения максимальной эффективности водоприемной поверхности. При опасности химического кольматажа отверстий величину потерь напора следует принимать не более 0,5—1 см, учитывая возможность увеличения потери по мере кольматажа.

Если принять минимальное значение коэффициента расхода $\mu=0{,}17$, то ориентировочно можно определить число отверстий по формуле

$$n=\frac{q}{0{,}17w_0\sqrt{981\cdot 1}}\approx 0{,}2\frac{q}{w_0}, \qquad (9.9)$$

где q — удельный водоприток, см³/с, w_0 — площадь отверстия, см².

Формулой (9.9) рекомендуется пользоваться для расчета числа отверстий в первом приближении. Если при этом общая площадь отверстий оказывается более 1 % площади поверхности трубы, то следует определять число отверстий более точно по формуле (9.5).

Отверстия на поверхности трубы размещают с учетом максимальной водопропускной способности и условий прочности трубы. Отверстия следует размещать не выше уровня воды в трубе. Расстояния между отверстиями желательно принимать не менее чем в 15—20 раз больше размера отверстий. Тогда отверстия практически не влияют на прочность трубы. В противном случае необходимо учитывать снижение прочности трубы под влиянием водоприемных отверстий. Коэффициент снижения прочности вычисляют по формуле

$$k_р = P_п / P = 1 - t / c, \tag{9.10}$$

где $P_п$ и P — прочность перфорированной и неперфорированной труб; t — размер отверстий (вдоль трубы); c — расстояние между отверстиями (вдоль трубы).

Зазоры на стыках труб. Возможность использования зазоров в качестве водоприемных отверстий проверяют гидравлическим расчетом. Необходимо, чтобы проницаемость фильтрующей обсыпки была в 10 и более раз выше проницаемости окружающего грунта. Тогда можно считать, что фильтрационный поток в обсыпке движется вдоль трубы от середины звена к зазорам. Движение потока в обсыпке сопровождается потерями напора $h_ф$, величину которого можно определить по формуле

$$h_ф = qL^2 / k_ф w_ф \cdot 8, \tag{9.11}$$

где L — длина трубы, т. е. расстояние между зазорами; q — приток на 1 м трубы (определяется гидрогеологическим расчетом); $w_ф$ — площадь потока в фильтрующей обсыпке, равная площади обсыпки ниже уровня воды в ней (приближенно — ниже уровня воды в трубе); $k_ф$ — коэффициент фильтрации фильтрующей обсыпки.

Вычисленную по формуле (9.11) величину потерь напора сравнивают с некоторой допустимой величиной $[h_ф]$, определяемой условием эффективности работы водозабора. При отсутствии особых требований следует принимать допустимую величину потерь $[h_ф]$ не более 3—5 см. Если $h_ф \leqslant [h_ф]$, то зазоры на стыках труб можно использовать в качестве водоприемных отверстий. Если $h_ф > [h_ф]$, то следует предусматривать специальные водоприемные отверстия в стенках труб.

Зазор, используемый в качестве водоприемного отверстия, следует оставлять открытым только в нижней части трубы, примерно на $^1/_3$ ее окружности. Верхняя часть зазора должна быть прикрыта или заделана во избежание просыпания грунта или обсыпки в трубу. Необходимый размер зазора определяют гидравлическим расчетом. Очевидно, что зазор работает как донное отверстие, поэтому для его расчета используются формулы (9.5) и (9.8), которые применительно к зазору приобретают следующий вид:

$$w_з = \frac{qL}{0{,}2\sqrt{gd_{10}}}; \tag{9.12}$$

$$w_з = \frac{qL}{\mu\sqrt{2gh_0}}, \tag{9.13}$$

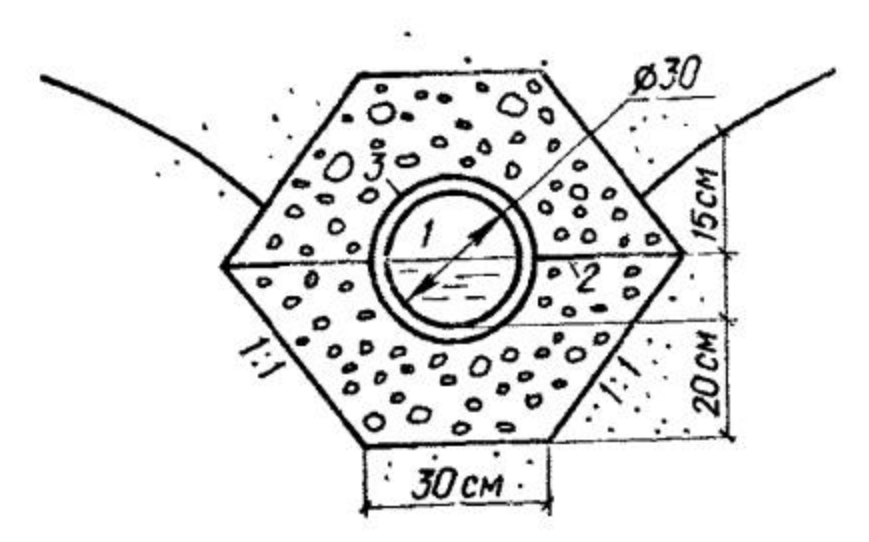


Рис. 9.10. Конструктивная схема трубчатого водозабора

1 — уровень воды в трубе; *2* — уровень воды в фильтрующей обсыпке; *3* — труба

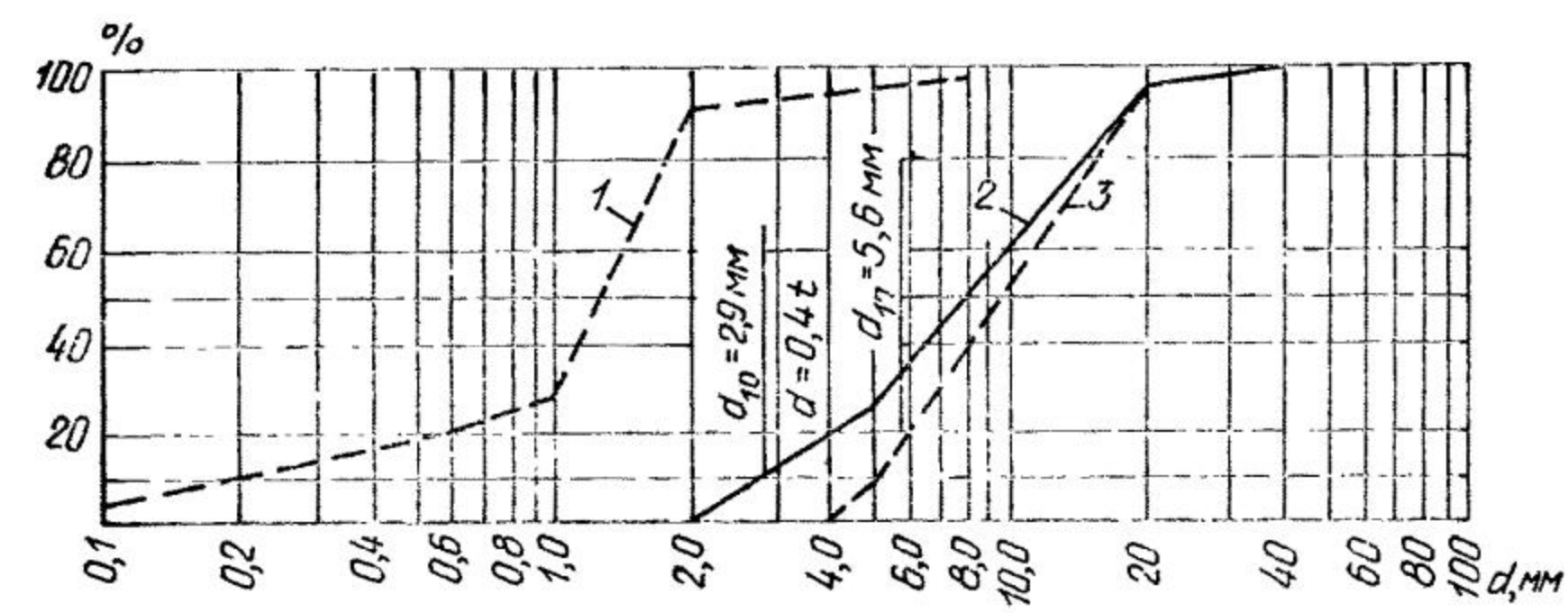


Рис. 9.11. Кривые гранулометрического состава

1 — грунта; *2* — фильтрующей обсыпки; *3* — то же, но исключены фракции меньше $0{,}4t_0$

где q — приток на 1 м трубы; L — длина трубы (расстояние между зазорами); остальные обозначения даны в пояснениях к формулам (9.5) и (9.8).

Коэффициент расхода определяется как и ранее. Из двух значений w_3 окончательно принимают наибольшие, и в зависимости от рабочей длины зазора (через которую вода поступает в трубу) определяют необходимую ширину зазора.

Пример расчета. Дана конструктивная схема водозабора (рис. 9.10). Труба асбестоцементная. Длина звена трубы $L=300$ см. Фильтрующая обсыпка (рис. 9.11) имеет коэффициент фильтрации $k_ф=1800$ м/сут$=2{,}08$ см/с. Приток к водозабору составляет $q=2{,}3$ м^3/сут, или 26,6 см^3/с. В расчете на 1 м длины он равен 0,266 см^2/с. Необходимо рассчитать водоприемную поверхность трубы.

Вариант I. Сначала проверим возможность использования в качестве водоприемных отверстий зазоров на стыках труб. Для расчета по формуле (9.9) вычисляем площадь потока в фильтрующей обсыпке. Согласно рис. 9.10, $w_0(30+35)\cdot 35-1/2\cdot\pi/4\cdot 36^2=1765$ см^2. По формуле (9.11) находим $h_ф=\dfrac{0{,}266\cdot 300^2}{2{,}00\cdot 1765\cdot 8}=0{,}81$ см. Потери незначительны, поэтому зазоры на стыках можно использовать в качестве водоприемных отверстий.

По формуле (9.10) вычисляем необходимую площадь зазора, предварительно найдя по рис. 9.11 (кривая *2*) $d_{10}=0{,}29$ см

$$w_3=\frac{0{,}266\cdot 300}{0{,}2\sqrt{981\cdot 0{,}29}}=23{,}7\ \text{см}^2.$$

По формуле (9.9) площадь будет заведомо меньше. Зазор прикрываем сверху на 2—3 длины окружности трубы. Длина открытой части зазора $l_3=\frac{1}{3}\pi\cdot 33=$ $=34{,}6$ см. Необходимая ширина зазора $b_3=w_3/l_3=23{,}7/34{,}6=0{,}69$ см.

Вариант II. Стыки труб закрыты муфтами; водоприемные отверстия в стенках труб; отверстия просверливаются. Диаметр отверстия принимаем $t_0=1$ см. Площадь отверстия $w_0=0{,}785$ см^2.

Для расчета числа отверстий предварительно принимаем $h_0=0{,}5$ см. По формуле (9.6) находим $\mathrm{Re}=\frac{1\sqrt{2\cdot 981\cdot 0{,}5}}{0{,}0731}=2390$. В составе фильтрующей обсыпки (см. рис. 9.11) выделяем часть с фракциями крупностью $0{,}4t_0=0{,}4$ см и в выделенной части (кривая *3*) находим $d_{17}=5{,}6$ см.

При $d_{17}/t_0=5{,}6/10=0{,}56$ и $\mathrm{Re}=2390$ находим по табл. 9.1 значение $\mu=0{,}21$. По формуле (9.5) вычисляем необходимое число отверстий на 1 м трубы:

$$n=\frac{26{,}6}{0{,}21\cdot 0{,}785\cdot 2\cdot 981\cdot 0{,}5}=5{,}15.$$

Принимаем $n=6$. Для сравнения вычисляем число отверстий по приближенной формуле (9.8):

$$n=0{,}2\frac{26{,}6}{0{,}785}=6{,}8.$$

Отверстия размещаем с двух сторон трубы. Расстояния между отверстиями в ряду принимаем $l_0=30$ см.

9.6. Расчет водоприемной способности труб в горизонтальных водозаборах

Гидравлические расчеты проводят для определения диаметров труб. Если же диаметры труб известны — рассчитывают уклон водозабора, обеспечивающего поступающий расход воды. Величину отводимого расхода Q определяют, выполняя гидрогеологические расчеты. Допустимую среднюю скорость движения воды в трубах выбирают из условия недопустимости заиления труб и размыва окружающего грунта (на участке перфорированных труб).

Скорость движения воды в трубах принимают 0,15—1 м/с. Для труб, уложенных в глинистых грунтах, наименьшую скорость движения принимают в пределах 0,15—0,2 м/с; в песчаных грунтах — 0,3—0,35 м/с. Оптимальная скорость движения 0,5—0,7 м/с. Наибольшую скорость назначают не более 1 м/с. На глухих участках труб скорость течения можно довести до 1,5 м/с, если это не приводит к заметному заглублению водозабора.

Пропускная способность труб должна соответствовать максимальному ожидаемому дебиту. При этом не следует добиваться заполнения труб водой на все сечение. Максимальная пропускная способность соответствует глубине заполнения труб (рис. 9.12) $h=0{,}9$—$0{,}93$, а наибольшая скорость движения воды при наполнении на $0{,}18d$. Практически глубину наполнения в водозаборах следует принимать не менее $0{,}3d$.

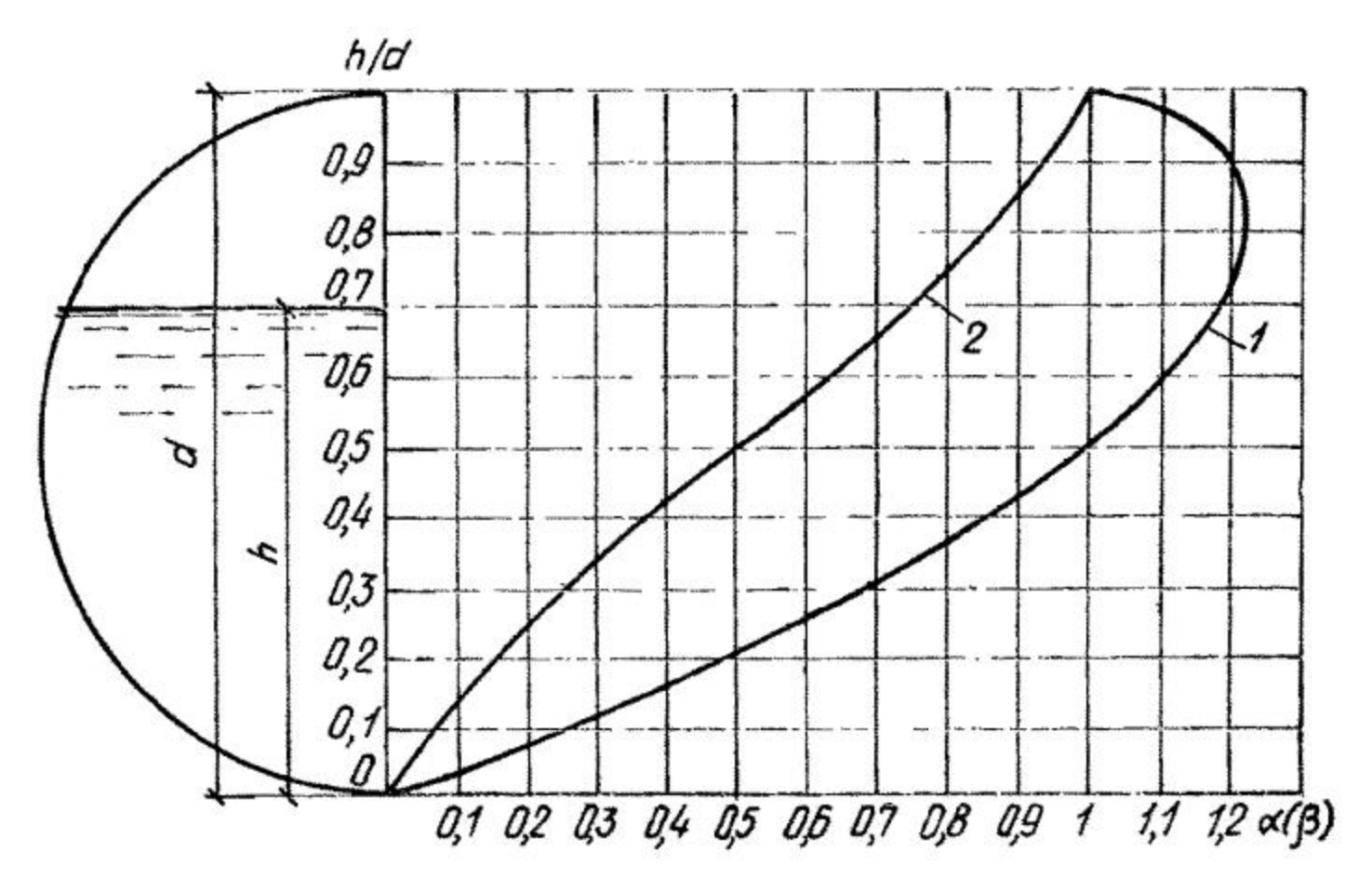


Рис. 9.12. Зависимость коэффициентов α и β от степени заполнения труб водой
1 — кривая $\alpha=\psi(h/d)$ — по скоростному признаку; *2* — кривая $\beta=h/d$ — по пропускной способности

Зная приток Q, поступающий в водозабор, допустимую скорость движения воды в трубах $v_{доп}$ и задавшись степенью заполнения труб h/d, вычисляют диаметр труб:

$$d=\sqrt{4Q/\beta\pi v_{доп}}, \qquad (9.14)$$

где β — коэффициент, зависящий от степени заполнения h/d, определяемый по кривой *2* (см. рис. 9.12).

Исходя из условий нормальной эксплуатации водозабора этот диаметр должен быть не менее 200 мм.

Уклон труб определяют по формуле Шези

$$i=Q^2/s^2c^2R, \qquad (9.15)$$

где s — площадь живого сечения потока; R — гидравлический радиус; c — коэффициент сопротивления.

Площадь живого сечения s и гидравлический радиус R являются функциями степени наполнения h/d и вычисляются по формулам:

$$s=\beta\pi d^2/4; \qquad (9.16)$$

$$R=\alpha d/4. \qquad (9.17)$$

Коэффициенты α и β берут из графика на рис. 9.12. Коэффициент сопротивления c вычисляют по формуле Н. Н. Павловского

$$c=R^y/n; \quad y=2\sqrt{n}-0{,}13-0{,}75\sqrt{R}(\sqrt{n}-0{,}1), \qquad (9{,}18)$$

где n — коэффициент шероховатости, значения которого при расчете труб принимают 0,012—0,015.

Значения коэффициента c в зависимости от n и гидравлического радиуса R можно также определить и по формуле Маннинга

$$c = 1 \cdot R^{1/6}/n. \qquad (9.19)$$

На перфорированных участках труб вода поступает из пласта, поэтому по длине трубы расход будет переменным: увеличивается от нуля в начале водозабора, т. е. в сечении $x=0$, до Q в конце водозабора, т. е. в сечении $x=\alpha$. Диаметр труб в этом случае также определяют по формуле (9.14), в которой Q — расход в концевом сечении водозабора.

Считая, что поступление воды из пласта происходит равномерно по длине водозабора, уклон в произвольном сечении на расстоянии x от начала можно найти по формуле

$$i = \frac{Q^2x^2}{L^2s^2c^2R}, \qquad (9.20)$$

а средний уклон всего водозабора длиной α — по формуле

$$i_{ср} = Q/3s^2c^2R. \qquad (9.21)$$

Гидравлический расчет выполняют так же, как и расчет перфорированных участков водозаборов из обычных труб, — по формулам (9.20) и (9.21).

ГЛАВА 10. ЛУЧЕВЫЕ ВОДОЗАБОРЫ

10.1. Типы, конструкции, условия применения

Лучевые водозаборы в отечественной водохозяйственной практике применяются относительно редко. В последние годы получили распространение малые лучевые водозаборы, отличающиеся сравнительно небольшой длиной лучей — горизонтальных скважин. Опыт проектирования и эксплуатации лучевых водозаборов показал, что их наиболее целесообразно применять в водоносных пластах, кровля которых залегает на глубине не более 15—20 м и при относительно небольшой мощности водоносного пласта, находящейся в пределах 5—20 м. Лучевые водозаборы позволяют осуществить отбор воды под руслом реки или ложем водохранилища и эффективно каптировать неоднородные в разрезе водоносные пласты, устраивая лучи в наиболее проницаемых зонах разреза.

По условиям производства работ лучевые водозаборы не рекомендуется применять в гравийно-галечниковых породах и в песчаных водоносных пластах с включениями валунов.

В состав лучевых водозаборов входят водосборный колодец (шахта), водоприемные лучи-фильтры (горизонтальные скважины) и насосная установка. В зависимости от гидрогеологических условий применяют следующие схемы лучевых водозаборов: водозаборы обычного типа с одним ярусом горизонтальных скважин, мно-

гоярусный лучевой водозабор с расположением фильтров на разных уровнях, малый лучевой водозабор с центральной водосборной скважиной, сооружают которую бурением. Принципиально возможно устройство комбинированных водозаборов с вертикальными или наклонными скважинами-усилителями, которые бурят из водосборного колодца и каптируют нижележащий водоносный горизонт. Для усиления притока в водосборный колодец в стенках и днище шахты устраивают фильтрующие вставки из пористых материалов (пористого бетона, пористой керамики и т. д.).

Важнейшие элементы строительства лучевого водозабора — сооружение шахтного ствола, горизонтальных лучей (скважин) и оборудование последних водоприемными устройствами с последующей прокачкой.

10.2. Способы и технические средства производства работ

Водосборный шахтный колодец служит для сбора воды и может проходиться следующими способами.

Строительство шахтных стволов способом «стена в грунте». Сущность способа заключается в том, что ограждающая стенка шахтного ствола возводится в траншее, борта которой удерживаются от обрушения при помощи глинистого раствора, создающего в ней избыточное давление. Форма шахтного ствола может быть квадратной или круглой. Стенка ствола имеет толщину 0,3—0,5 м и может быть выполнена из бетона, монолитного или сборного железобетона. Возведение ее осуществляют отдельными секциями-захватками. Бетонирование ведут методом ВПТ (вертикально перемещающихся труб). Монтаж сборной железобетонной стенки выполняют из отдельных элементов с последующим замоноличиванием их стыков.

Траншею разрабатывают буровым способом специальными агрегатами и машинами [(СВД-500, барражная машина БМ-10/5, барражная машина БМ-50(0,5)], траншейными драглайнами и грейферами.

Грунт в шахтном стволе может разрабатываться насухо с проведением глубинного водопонижения или поверхностного водоотлива, а также из-под воды без водопонижения. Для разработки грунта внутри шахтного ствола используют грейферы, гидроэлеваторы.

Строительство шахтных стволов при помощи секущих свай. Устройство их осуществляют буровым роторным станком, например IБА-15В, использованием лидерно-направляющих труб двух типов: извлекаемых из скважин ЛНТ-И и оставляемых в них ЛНТ-О. Установку таких труб в скважинах и извлечение из них также выполняют буровым станком.

Перед началом бурения скважин для обеспечения их вертикальности на подготовленной для специальных работ площадке

устраивают форшахту из монолитного железобетона. Строительство шахтных стволов этим способом сопряжено с большой сложностью обеспечения вертикальности скважин при их бурении, выемки грунта из ствола, а также со значительными капитальными затратами.

Строительство шахтных стволов способом задавливания. Из опыта строительства шахтных стволов малых размеров в сечении и значительной глубины (более 15 м) известно, что стволы подобного типа обладают сравнительно небольшой массой (60—80 т), которой недостаточно для преодоления сил трения, возникающих между стенкой ствола и грунтом.

Для уменьшения сил трения применяют подмыв, тиксотропные рубашки, эпоксидные обмазки. Однако эти мероприятия зачастую не обеспечивают нормального погружения шахтных стволов под действием собственного веса, особенно в неоднородном грунте.

Во избежание зависания стенки ствола ее задавливают в грунт с помощью домкратов, опирающихся на упорную конструкцию, которая может быть различной. Задавливают ограждающую стенку ствола по мере разработки грунта и выдачи его на поверхность со следующим опережением режущей кромки ножа поверхности забоя: в песках и плывунах — на 1,5—2 м, супесях и суглинках — на 0,75 м и в глинах — на 0,5 м. Этот способ погружения шахтных стволов применяют при наращивании стен сборными железобетонными и грунтовыми кольцами или при выполнении их из монолитного железобетона. Практика показывает, что устройство шахтных стволов рентабельно при их диаметре до 3 м — из железобетонных колец, а свыше 3 м — из монолитного железобетона. Погружение ограждающей стенки шахтного ствола в грунт с помощью задавливания осуществляют на глубине свыше 20 м с тиксотропной рубашкой. При сборной ограждающей стенке шахтного ствола соединение блоков в кольца и колец между собой выполняют посредством электросварки закладных деталей.

За рубежом стыки колец шахтного ствола склеивают между собой раствором из двух компонентов: смолы и чистого песка [17]. Время затвердевания раствора 8—12 ч.

Разработку грунта и выдачу его на поверхность осуществляют лепестковым грейфером. Для задавливания шахтных стволов применяют гидравлические домкраты усилием 500—1500 кН с ходом штока 0,8—1,2 м (марки домкратов Д-10, ЛТ-642, СБ-199 и др.). Для создания необходимого давления применяют насос высокого давления Н-403Е.

В целях повышения производительности труда, максимальной индустриализации и механизации работ, улучшения условий труда рабочих и сокращения сроков строительства трестом Укргидроспецфундаментстрой (г. Днепропетровск) разработана специальная технология для строительства шахтных стволов лучевых водозаборов. Она включает следующие операции.

1) Устройство анкерных опор, которые служат для крепления специальной гидравлической установки на усилие вдавливания до 4000 кН. Их выполняют из свай и ростверков.

2) Установка ножа и устройство форшахты. Из центральной части будущей форшахты вынимают верхний слой разнородного грунта до его сравнительно однородного сложения. Затем образованное углубление засыпают песком до отметки низа форшахты и дорабатывают грунт под кольцо форшахты на ее высоту. Далее на выровненное песчаное основание строго в горизонтальном положении устанавливают нож и к наружной его поверхности прикрепляют прокладку из транспортерной ленты (опалубку). После этого устанавливают и закрепляют арматурные каркасы форшахты и бетонируют ее.

3) Монтаж задавливающей установки. Станину задавливающей установки с приваренными к ней опорными плитами устанавливают на анкерные ростверки. После ее выверки опорные плиты приваривают к плитам в оголовке анкерных ростверков. Дальнейший монтаж задавливающей установки выполняют в соответствии с руководством по ее монтажу и эксплуатации.

4) Монтаж первого железобетонного кольца. На зафиксированный в форшахте нож с точной по нему центровкой устанавливают краном МКГ-25БР первое стеновое железобетонное кольцо. Затем с помощью геодезических инструментов проверяют горизонтальность положения ножа и вертикальность стен железобетонного кольца в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. После этого закладную деталь железобетонного кольца приваривают к ножу, на стеновое железобетонное кольцо навешивают стремянку, укрепляют его и срезают на нем монтажные петли, задавливают первое железобетонное кольцо, разрабатывают грунт в шахтном стволе, монтируют и задавливают последующие кольца.

При погружении шахтного ствола в грунт контроль за его вертикальностью осуществляют соответствующей системой автоматики, установленной на специальной задавливающей гидравлической установке. Система контроля не допускает отклонения шахтного ствола от его вертикальной оси более чем на 3°. В случае отклонения от этого требования происходит автоматическое выравнивание его. В результате обеспечивается высокое качество работ при строительстве шахтного ствола для лучевого водозабора.

Внедрение описанной выше технологии трестом Укргидроспецфундаментстрой позволило вчетверо сократить продолжительность сооружения шахтных стволов по сравнению с использованием способа «стена в грунте». Сроки строительства в лессовых грунтах одного шахтного ствола уменьшились до 1,5—2 мес.

Строительство шахтных стволов опускным способом с механизированной проходкой и креплением. Для строительства шахтных стволов лучевых дренажей опускным способом в весьма стесненных условиях застроенной территории институтом ВИОГЕМ разработана установка для их механизированной проходки и креп-

ления. С применением данной установки можно сооружать шахтные стволы в грунтах, представленных песками, суглинками, глинами, глинами с включением гальки и слабым песчаником. Техническая скорость проходки и крепления шахтного ствола 0,5 м/смену. Проведенные испытания подтвердили, что разработанная установка соответствует заданным условиям сооружения шахтных стволов.

Отдельные узлы установки доставляют обычным автомобильным транспортом. Для эксплуатации ее необходима площадка размером 15×15 м. Смонтировать установку можно за одну-две смены. Наличие гидравлического привода обеспечивает безопасные условия труда в условиях повышенной влажности. Анализ затрат времени на технологические операции показал, что путем улучшения организации труда и совершенствования технологических приемов, а также улучшения конструктивных элементов установки и крепи можно повысить производительность установки и скорость сооружения колодца до 1 м/смену.

Устройство лучевых фильтров. Известны два способа вскрытия водоносного пласта лучевыми скважинами при строительстве лучевых водозаборов. Один из них впервые применил в США Ранней, а второй, в Швейцарии, — Фельман. В настоящее время эти способы продолжают широко использовать в практике сооружения лучевых водозаборов для питьевого и хозяйственного водоснабжения, особенно часто за рубежом (США, ФРГ, Франция, Югославия, Италия, Польша, Венгрия и др.).

Устройство лучевых горизонтальных скважин по способу Раннея основано на продавливании в рыхлые песчано-гравелистые грунты фильтровых труб домкратами из шахтного ствола лучевого водозабора.

Способ устройства горизонтальных скважин Фельмана отличается от способа Раннея тем, что сначала из шахтного ствола лучевого водозабора продавливают обсадную трубу. По окончании проходки лучевой скважины в обсадную трубу вводят фильтровую трубу. Затем из лучевой скважины извлекают обсадную трубу и используют ее для проходки последующих лучевых скважин. Данный способ пригоден для строительства лучевых водозаборов в однородных песчаных грунтах без гравия.

При устройстве горизонтальных скважин в большинстве случаев предусматривают применение домкратных толкающих устройств, кроме того, возможно использование вращательных, виброударных и других видов горизонтального бурения.

Из технических средств, применяемых за рубежом, которые также можно использовать для сооружения лучевых скважин, наибольший интерес представляют станки для бурения горизонтальных скважин, выпускаемые японской фирмой ТОНЭ БОРИНГ серии *ТОР* (см. таблицу). В основу их действия положен принцип бурения горизонтальной скважины двойной колонной труб, оснащенных породоразрушающим инструментом, при котором внешняя

колонна труб служит своеобразным щитом для внутренней колонны труб. Станки для горизонтального бурения серии *ТОР* оснащены двумя шпинделями, автономно вращающими внутреннюю и внешнюю колонны труб с одинаковой скоростью в одном и том же направлении. Это позволяет бурить горизонтальные скважины по следующим схемам: а) одновременно двумя колоннами труб; б) вначале бурение скважины колонной внутренних труб, а затем ее расширение колонной внешних труб.

Техническая характеристика буровых станков для бурения горизонтальных скважин серии *ТОР*

Технические данные	*ТОР-S*	*ТОР-М*	*ТОР-α*	*ТОР-I*
Глубина бурения, м:				
керновое с обратной промывкой	150	500	1000	1500
призабойное пневмоударное	50	150	300	—
Усилие подачи, кН	0—30	0—60	0—100	0—200
Силовая установка, кВт	18,5	37	55	55
Размеры, мм:				
длина	3420	3540	4000	5000
ширина	600	700	800	1420
высота	680	900	900	1400
Масса, кг	1200	2100	2700	7500

Бурение горизонтальной скважины осуществляют главным образом внутренней колонной труб (шланг) с буровым долотом. Внешняя колонна труб служит преимущественно для предохранения внутренней колонны труб от влияния окружающих пород.

Наличие приводов с высокими крутящими моментами на буровых станках серии *ТОР*, большое усилие их подачи, использование двойной колонны высокопрочных труб позволяют вести высокооборотное бурение горизонтальной скважины даже в неустойчивых сильно нарушенных грунтах в 2—6 быстрее по сравнению с обычным способом бурения. Буровые станки обеспечены пневмоударными, трехшарошечными, крестообразными и алмазными долотами.

Пневмоударное долото успешно применяют для бурения по твердым породам. При ударно-вращательном бурении оно работает от призабойного молотка, который расположен в щитовой бурильной трубе и продвигается одновременно с ней. Шлам отводится с помощью воздуха через кольцевое пространство между буровыми штангами и щитовой наружной трубой. Трехшарошечное долото, закрепленое на внутренней колонне бурильных труб, применяют в основном при бурении по песчаным и гравийным породам, трещиноватым зонам, а также мягким породам. Крестообразное долото, применяемое вместо трехшарошечного долота для бурения горизонтальной скважины по твердым породам, пригодно

также для бурения по глинистым грунтам. Алмазным долотом, находящимся на внутренней колонне труб, ведут бурение горизонтальной скважины по твердым породам с отбором керна. Последний при обратной промывке выпускается непрерывно через внутреннюю колонну труб.

Из буровых станков, выпускаемых японской фирмой ТОНЭ БОРИНГ, для сооружения лучевых горизонтальных скважин достаточно использовать только две модели: *TOP-S'* и *TOP-M*, причем в тех случаях, когда скважины задаются большой длины (до 200—400 м и более). Использование таких станков, длина которых около 4 м, требует строительства шахтных стволов повышенных размеров (диаметром до 9—10 м).

К числу известных станков отечественного производства, предназначенных для сооружения горизонтальных скважин, можно отнести также буровые станки Б-15с, ЛБС-4, СБГ-200, БГА-2, БГА-4, СБГ-1М, СБД-1, БИК-2 и др. Характерная их особенность заключается в том, что бурение ими скважин осуществляют в условиях, когда не требуется специальных мероприятий, предотвращающих обрушение стенок скважин. Анализ конструкций данных станков показывает, что оии могут быть использованы для сооружения горизонтальных скважин лучевых водозаборов лишь в крепких трещиноватых породах.

Институтом ВИОГЕМ разработан способ вскрытия водоносного пласта лучевыми горизонтальными скважинами с сохранением естественной водопроницаемости грунтов в прифильтровой зоне и предотвращением обрушения стенок скважин на период оборудования их фильтрами. Сущность способа заключается в проходке лучевой горизонтальной дренажной скважины в водоносном пласте двойной вращающей колонной: шнековой и колонной рабочих (обсадных) труб с применением в качестве промывочной жидкости подземной или технической воды. В этих условиях фильтрация естественного глинистого раствора при его циркуляции происходит через стенки скважины в ее призабойной зоне. В результате срезания стенок скважины обеспечивается максимальное сохранение естественной водопроницаемости водоносного пласта. При вскрытии водоносного пласта, содержащего песчаные грунты, глинизации стенок скважины не происходит.

Этот способ вскрытия водоносного пласта лучевыми скважинами наиболее эффективен и перспективен, особенно при бурении скважин в слабопроницаемых глинистых, а также в песчаных грунтах.

Для реализации этого способа вскрытия водоносного пласта лучевыми скважинами в институте ВИОГЕМ разработана установка лучевого бурения УЛБ-130. С помощью этой установки можно из шахтных стволов глубиной до 30 м и диаметром не менее 3,5 м сооружать лучевые горизонтальные скважины в рыхлых породах крепостью по шкале Протодьяконова менее 3.

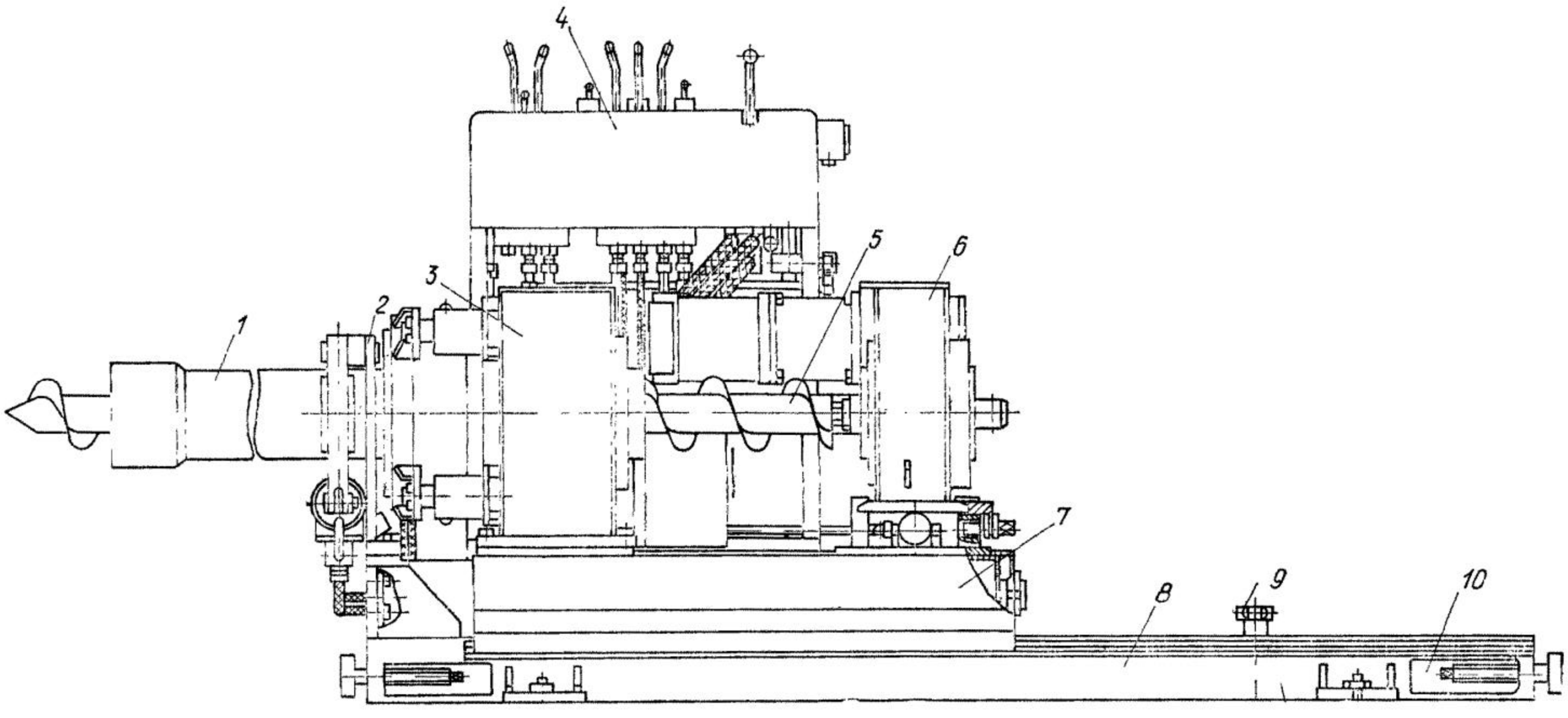


Рис. 10.1. Буровой агрегат установки лучевого бурения УЛБ-130

Установка УЛБ-130 (рис. 10.1) состоит из трех основных узлов: бурового агрегата, пульта управления и маслостанции. Буровой агрегат является основным рабочим органом, состоящим из двух вращателей — вращателя *3* рабочих (обсадных) труб *1* и вращателя *6* бурильных штанг — шнеков *5*. Вращатель рабочих труб размещен на подвижной раме *7*, которая посредством гидроцилиндра подачи передвигается по направляющим рамы на величину хода 1000 мм. На неподвижной раме *8* (в передней части) укреплен подхват *2* для рабочих труб (гидроключ), предназначенный для их свинчивания и развинчивания, а на корпусе цилиндра подачи расположен подхват-упор для удобства и облегчения работы при наращивании секции рабочих труб. Неподвижная рама посредством осей и стойки шарнирно соединена с опорной рамой сварной конструкции, на которой установлены домкраты *9*, позволяющие придать раме угол наклона ±10° (к горизонту).

Буровой агрегат с пультом управления *4* монтируют в шахтном стволе на подготовленном рабочем полке́, выверяют на заданный угол вертикальными домкратами *9* и расширяют в стенки ствола через специальные упоры горизонтальными домкратами *10*.

Маслостанция представляет собой автономный блок, предназначенный для подачи масла к приводам бурового агрегата. Она смонтирована на единой сварной раме, на которой установлены маслобак в сборе с фильтрами гидросистемы трактора Т-74 и редукторов насоса с приводом от электродвигателя А02-81. Маслостанцию располагают на поверхности вблизи шахтного ствола.

Подключение электродвигателя к силовой сети осуществляют посредством пускателя типа ПА-532 и кнопочной станции КУ-12. Кроме того, к пускателю подсоединена дублирующая кнопка аварийного отключения КУВ-11, находящаяся в шахтном стволе непосредственно у пульта управления.

Разводка маслопроводов включает рукава высокого и низкого давления, а также трубопроводы. Все маслопроводы и трубопроводы оснащены необходимой арматурой для подключения к гидроагрегатам. Пульт управления смонтирован в виде отдельного блока и предназначен для управления работой приводов бурового агрегата, маслонасосов и электродвигателя маслостанции. Он состоит из сварного остова, на котором смонтирована панель с кнопками и рукоятками пусковой, управляющей и регулирующей аппаратуры.

Технические данные установки УЛБ-130

Глубина бурения, м	до 130
Диаметр бурения, мм	до 200
Высота бурения (от полка́), мм	600
Угол наклона скважины к горизонту, град	±10
Минимальный внутренний диаметр шахтного ствола, м	3,5
Усилие подачи, кгс (кН)	7450 (74,5)
Ход подачи инструмента, мм	1000

Скорость подачи, м/мин:	
рабочая	до 1,85
маневровая	до 10
Усилие для извлечения рабочих труб, кгс (кН)	11 300 (113)
Крутящий момент (*max*), кг·м (кН·м)	до 1500 (15)
Скорость обратного хода, м/мин:	
рабочая	до 1,2
маневровая	до 7
Диаметр рабочих (обсадных) труб, мм	168
Число оборотов рабочих труб, об/мин ($с^{-1}$)	0—6
Диаметр шнеков, мм	140
Число оборотов шнеков, об/мин ($с^{-1}$)	до 160 (2,8)
Крутящий момент колонны шнеков (*max*), кг·м (кН·м)	до 90 (0,9)
Привод вращателей и подачи (регулирование бесступенчатое)	гидравлический
Давление рабочее максимальное, кгс/см² (МПа)	100 (10)
Привод насосов маслостанции	электрический
Мощность электродвигателя, кВт	30
Габариты установки (бурового агрегата), мм:	
длина	2500
ширина	800
высота	1250
Масса установки, кг	1200
Габариты маслостанции, мм:	
длина	1600
ширина	900
высота	1250
Масса маслостанции, кг	800
Масса бурового инструмента, кг	7350

Гидропривод установки позволяет плавно регулировать вращение рабочих труб и шнеков, что дает возможность устанавливать оптимальный режим бурения лучевой скважины и оборудовать ее различными типами фильтров.

10.3. Расчет дебита лучевых водозаборов

Дебит одиночной горизонтальной скважины при ее работе в напорном пласте можно подсчитать по формуле

$$Q=\frac{2\pi Ts}{\ln\sqrt{\frac{R^2}{l^2+r_0^2}}+1-\frac{r_0}{l}\operatorname{arctg}\frac{l}{r_0}-\frac{h}{2l}\left(\frac{2\pi r_0}{h}\sin\frac{\pi Q_0}{h}\right)}, \qquad (10.1)$$

где T — проводимость водоносного пласта; h — его мощность; s — понижение над горизонтальной скважиной; R — радиус действия водозабора; l — длина горизонтальной скважины; r_0 — ее радиус; Q_0 — расстояние от оси скважины до подошвы пласта.

Эту формулу с некоторым приближением можно применить и для безнапорных пластов, если принять $h=h_{ср}$.

Для определения дебита одиночных и куста симметрично расположенных в нем n ($1<n<4$) горизонтальных скважин Ю. П. Борисовым и В. П. Табаковым методом фильтрационных сопротив-

лений (при $a_0=h/2$) получена достаточно простая приближенная формула

$$Q_к = \frac{2\pi Ts}{\ln\frac{\lambda R}{l} + \frac{h}{nl}\ln\frac{h}{2\pi r_0}}. \qquad (10.2)$$

Величина λ зависит от n:

n	1	2	3	4
$\lambda(n)$	4	2	1,86	1,78

Формулу (10.2) можно переписать так:

$$Q_к = \frac{2\pi khs}{\ln\frac{R}{R_0}}, \qquad (10.3)$$

где $Q_к$ — дебит куста скважин; R_0 — эквивалентный радиус большого колодца, дебит которого равен дебиту куста горизонтальных скважин:

$$R_0 = \ln(l/\lambda) + (h/\lambda l)\ln(h/2\pi r_0). \qquad (10.4)$$

Производительность лучевого водозабора, состоящего из симметрично расположенных лучей, при неустановившемся движении можно определить по формуле Г. А. Разумова [17]

$$Q_к = \frac{2\pi k(h_e^2 - h_0^2)N}{\left(\ln\frac{at}{m^2} - \frac{15,6}{\sqrt[5]{\bar{l}+3\bar{D}}}\right)n + \frac{3D+3,6}{\bar{l}}}, \qquad (10.5)$$

где h_e и h_0 — соответственно статический и динамический уровни подземных вод; N — число горизонтальных лучевых скважин; a — коэффициент уровнепроводности пласта; m — средняя его мощность, равная $0,5(h_e+h_0)$; $\bar{l}$ — относительная длина горизонтальной скважины, равная l/m; $\bar{D}$ — относительный диаметр водосборного колодца, равный $\bar{D}/2m$; D — его диаметр; $n=360°/\alpha$ (α — угол между лучами, град.).

Необходимо отметить, что расчеты по приведенным зависимостям могут привести к значительным погрешностям, если не учитывать гидравлику потока собственно в горизонтальных дренах.

При расчете дебита лучевого водозабора рекомендуется определять понижение на поверхности дрены, вычитая из понижения уровня воды в водосборном колодце при откачке s гидравлические потери в горизонтальных лучах, определяемые по формуле

$$h_w = \left(1 + \frac{\lambda^* l}{6r_0}\right)\frac{v_{0ж}}{2g}, \qquad (10.6)$$

где $v_{0ж} = \dfrac{Q_s}{2\pi r_0^2 N}$,

l, r_0 — длина и радиус скважин-лучей; Q_s, N — дебит и число равнодебитных лучей; g — ускорение силы тяжести; λ^* — коэффициент потерь, распределенных по длине луча.

Потери, связанные с притоком воды через входные отверстия фильтров, не учитываются. Очевидно, что неучет дополнительных потерь напора приведет к получению фактически заниженного дебита лучевого водозабора.

М. С. Таршишем получено решение задачи для определения дополнительных потерь напора в лучевых скважинах для случая постоянного притока по длине скважины в предположении, что дополнительные потери напора ΔH_0 в водоприемных отверстиях связаны с расходом Q_0 через одно отверстие известным соотношением

$$Q_0 = \mu w_0 \sqrt{2g\Delta H_0}, \qquad (10.7)$$

где μ — коэффициент расхода; w_0 — площадь проходного отверстия.

Необходимое суммарное дополнительное понижение при постоянном расходе на единицу длины дрены получено в виде

$$\Delta s = \frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{\pi r_c^2}\right)^2\left[\left(\frac{4}{3}\beta + \frac{\lambda^* l}{8r_c}\right) + \frac{1}{4}\left(\frac{r_c}{l\eta\mu}\right)^2\right], \qquad (10.8)$$

где r_c — радиус продольного отверстия фильтра скважины; β — коэффициент Буссинеска в выражении потока количества движения; η — скважность фильтра.

Тестовые расчеты фактических значений понижений уровней при заданном водоотборе при $\beta=1$, $\mu=0{,}05$—$0{,}3$, $\lambda^*=0{,}1$ и $\eta=2{,}5$ % показывают, что дополнительное понижение напора в лучевых скважинах может достигать 40 % общего, причем погрешность возрастает при уменьшении μ.

Использование зависимости (10.8) для определения поправки к понижению уровня воды обеспечивает существенное приближение результатов расчета дебита к действительной его величине.

ГЛАВА 11. КАПТАЖ ИСТОЧНИКОВ

11.1. Гидрогеологические условия выхода источников и оценка их производительности

Источники (ключи, родники) являются выходами подземных вод на поверхность земли. Условия выхода источников весьма разнообразны. В основном их делят на нисходящие и восходящие источники. На рис. 11.1 показан нисходящий источник с двумя выходами на поверхность земли: с расходом Q_1 — на поверхность земли; с расходом Q_2 — дренируемым рекой. Каптаж А полностью перехватывает оба выхода источника.

При анализе дебита восходящих источников необходимо иметь данные о гидрогеологических условиях водоносного горизонта, питающего источник, и в особенности детальные данные об условиях выхода источника. Восходящие источники могут являться выходами только части воды подземного потока, например в Белгороде

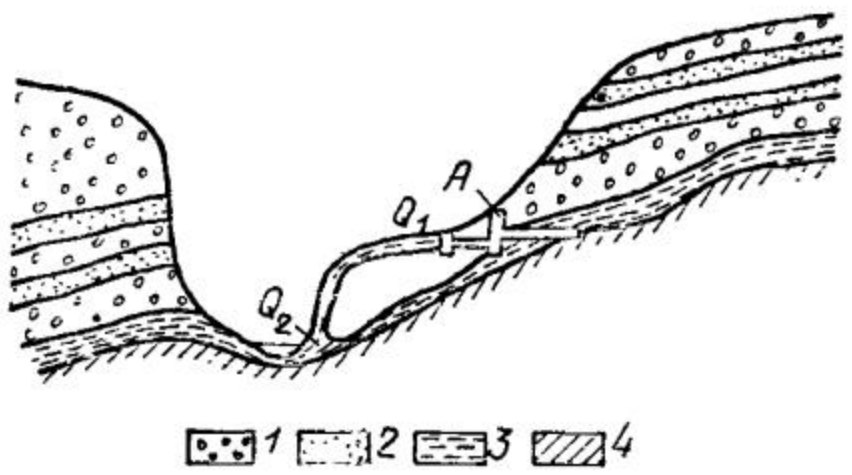


Рис. 11.1. Каптаж источника путем полного перехвата подземного потока

1 — галечники с песком; *2* — пески; *3* — водоносный слой в песках; *4* — водонепроницаемая порода; Q_1 — выход источника с каптажем А, полностью захватывающий подземные воды; Q_2 — нижний (второй) выход источника до каптажа в реку

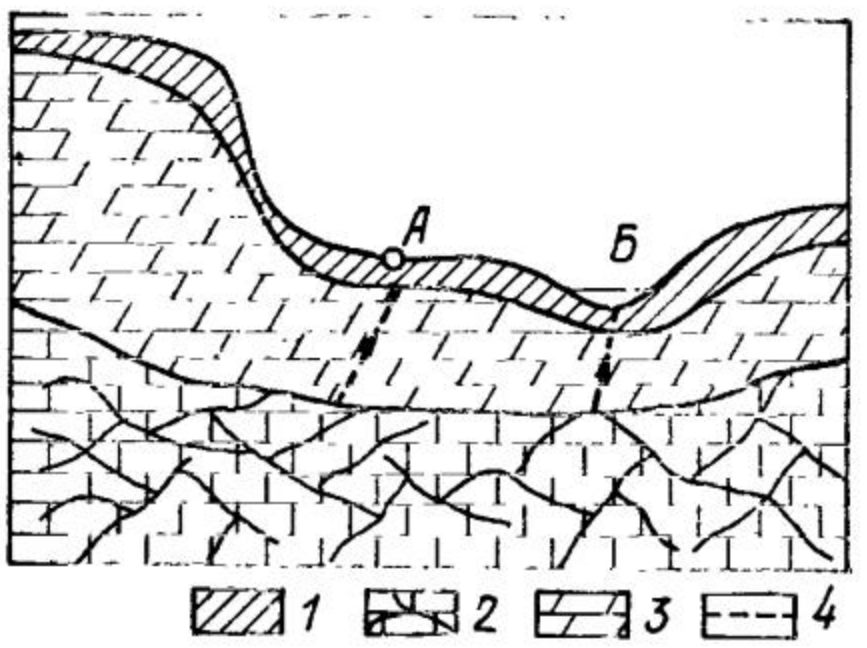
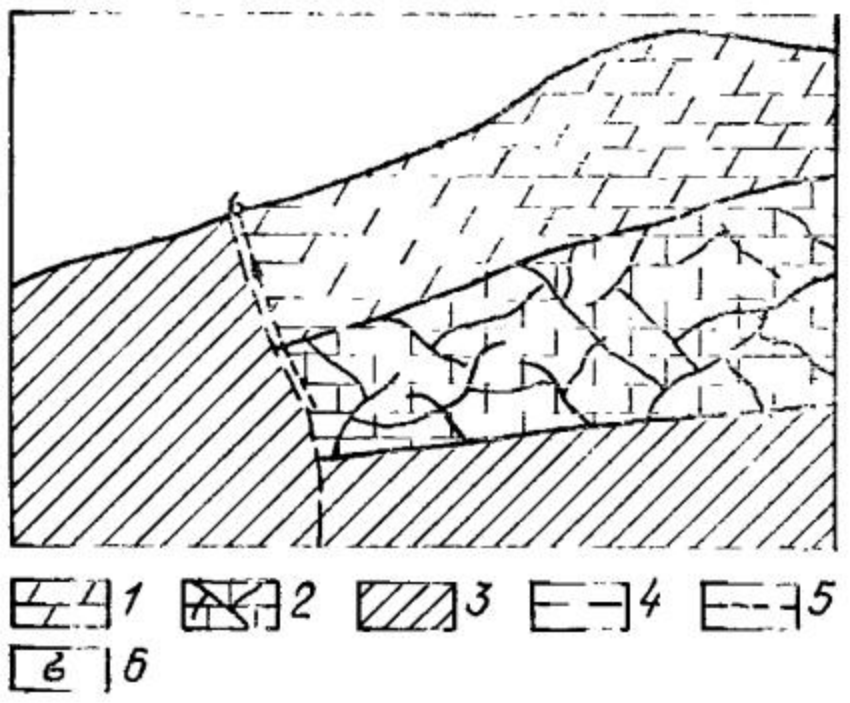


Рис. 11.2. Схема восходящего источника из трещиноватых верхнесенонских мелов в Белгороде

1 — делювиальные и аллювиальные отложения; *2* — трещиноватый водоносный мел; *3* — глинистый мел, в основном водонепроницаемый; *4* — путь восходящего потока подземных вод; *А* — место выхода источника; *В* — река

Рис. 11.3. Источник, вытекающий из сбросовой трещины с полным дренажем водоносного горизонта

1 — водонепроницаемые мергели; *2* — трещиноватые водоносные мергели; *3* — водонепроницаемые глинистые сланцы; *4* — линия сброса; *5* — путь восходящего потока подземных вод по линии сброса; *6* — источник



(рис. 11.2), или же полностью дренировать водоносный горизонт (рис. 11.3).

В первом случае (см. рис. 11.2) при понижении уровня в источнике (например, путем откачки) можно рассчитывать на устойчивое увеличение дебита. Во втором случае, когда один источник или группа их дренируют полностью водоносный горизонт, получить устойчивое увеличение дебита сложно. Источник может выходить непосредственно из породы водоносного горизонта в виде сосредоточенной струи или через толщу рыхлых пород. В последнем случае часть воды из водоносного слоя (иногда значительная) растекается по указанной толще рыхлой породы, не выходя на поверхность земли. Понижение уровня в источнике при таких условиях не только увеличивает поступление воды из водоносного

горизонта, но также привлекает воду, растекающуюся по толще рыхлой породы.

Увеличение дебита восходящего источника в этом случае можно получить путем расчистки его выхода или (что более рационально) путем вертикального каптажа (шахтный колодец или буровая скважина). Такое устройство каптажа фактически действует как понижение уровня воды в колодце.

Производительность источника обычно оценивают на основании наблюдений за его дебитом и сопоставления этого дебита с факторами, влияющими на его изменение. Но особенно важно при анализе изменения дебита источников учитывать гидрогеологические условия выхода и изменение этих условий при каптаже (см. рис. 11.1, 11.2). Анализ общих гидрогеологических условий — области питания, накопления и стока, а также участка выхода источника — очень важен для оценки изменчивости дебита последнего и рационального его каптажа с целью увеличения дебитов, особенно в периоды минимальных расходов.

Изменение величины питания водоносного горизонта небольшого распространения довольно быстро — через несколько дней, а иногда и через несколько часов — сказывается на расходе источников. Однако в литературе известны также случаи, когда это влияние обнаруживается только через 1—1,5 года; такой пример медленного влияния в области питания на дебит кяризов описан для северного подножия Копет-Дага.

Таким образом, только тщательное и глубокое изучение гидрологических условий позволяет правильно анализировать данные наблюдений за дебитом источника и сделать правильные выводы об эксплуатационной величине дебита. Изменение производительности источника может происходить также под влиянием изменения гидрогеологических условий как естественных, так и в особенности техногенных.

Изменение дебита источника является весьма важным элементом для оценки практического использования его. Средний многолетний расход Q_0 будем называть нормой расхода, а средний месячный $Q_м$ и годовой расход $Q_г$ соответственно месячной и годовой нормами расхода. Отношение расхода Q за любой отрезок времени к норме расхода Q_0 будем называть модульным коэффициентом k, который равен:

$$k = Q / Q_0. \qquad (11.1)$$

Отношение максимального расхода Q_{max} к минимальному Q_{min} будем называть коэффициентом неравномерности $k_н$:

$$k_н = Q_{max} / Q_{min}. \qquad (11.2)$$

Важнейшими характеристиками дебита источника являются норма расхода, минимальный и максимальный расходы, коэффициент неравномерности и модульный коэффициент для минимального расхода. Эти характериситки изменяются в зависимости от

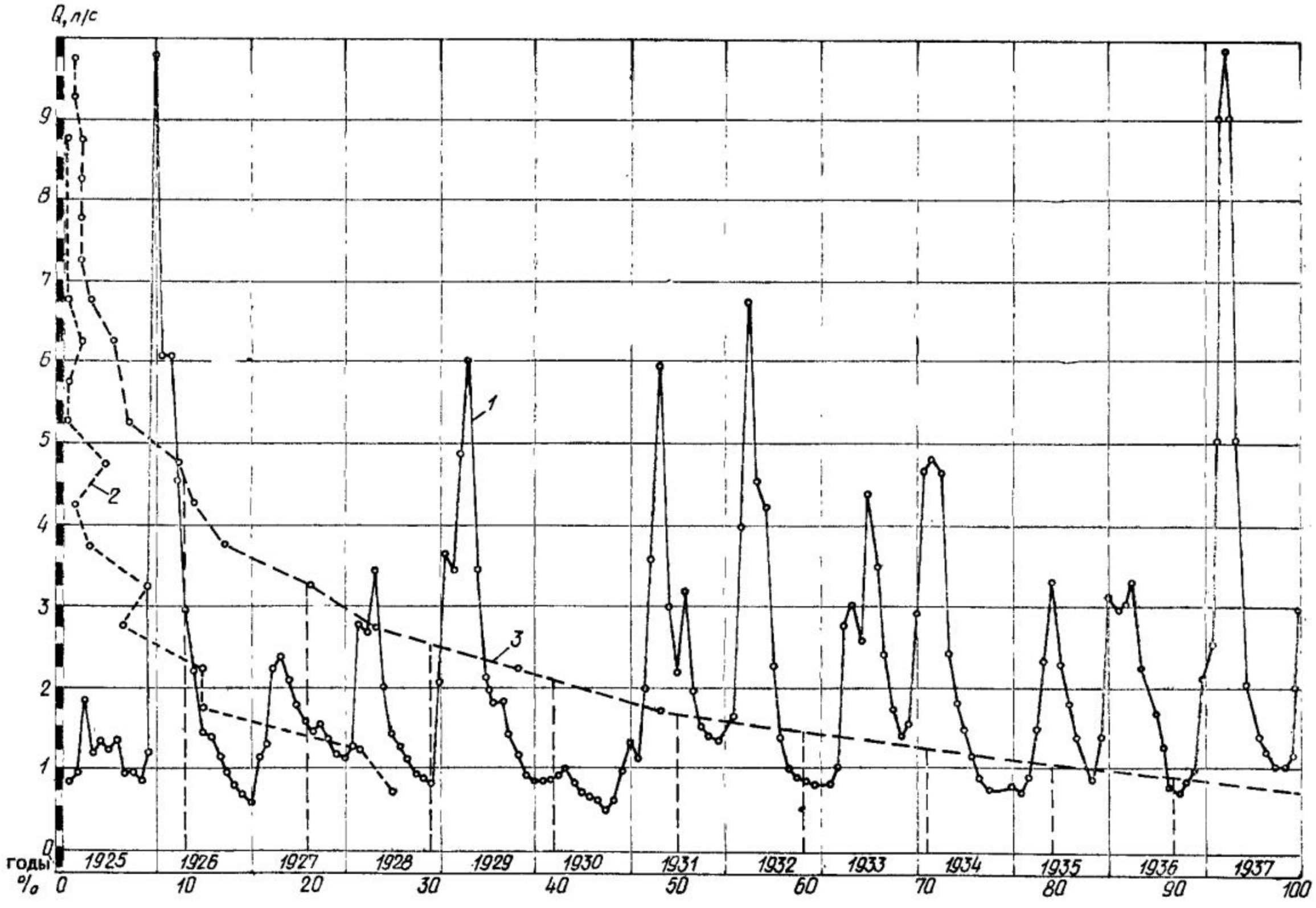


Рис. 11.4. График расхода одного из источников в Крыму (срок наблюдения — 13 лет)
1 — хронологический график расхода; *2* — кривая частоты; *3* — кривая обеспеченности

срока наблюдений. Минимальный расход вводится обычно при оценке полезной отдачи источника как расчетный. Однако следует учитывать, что максимальное потребление может совпасть с минимальным расходом источника.

Одни только наблюдения за год или за несколько лет недостаточны; на основании их выводить характеристики для источников без анализа закономерностей режима нельзя. Так как за источником наблюдают обычно мало времени, то необходимо путем всестороннего анализа выявлять перспективы изменения дебита.

Для оценки изменения дебита источника во времени может служить хронологический график дебита источника (рис. 11.4). По этому графику наглядно видны величины расходов, а также распределение по периодам года минимумов и максимумов расхода. Этот график составлен по месячным нормам расхода. На него целесообразно также наносить элементы, от которых зависит дебит источника, т. е. для соответствующих случаев осадки, температуру, влажность воздуха, расход и уровни поверхностных вод. По такому совмещенному графику можно судить о факторах, влияющих на дебит ключа.

Для суждения о повторяемости дебитов различной величины можно воспользоваться зависимостью функционального характера между величиной дебита и частотой его повторяемости. Такие функции носят название функций распределения: их лучше всего представить в виде ломаной кривой, называемой полигоном — многоугольником распределения. Для построения полигона дебита источника следует амплитуду крайних отклонений этого дебита разделить на разные интервалы и производить подсчет лет, месяцев или дней в каждом интервале.

Поясним построение полигона на примере рис. 11.5. Наибольшие расходы доходят до 10 л/с. Делим расходы на интервалы по 0,5 л/с и подсчитываем число месяцев, на которые приходятся расходы в этом интервале (см. таблицу). Затем из середины интервалов проводят абсциссы (в масштабе), соответствующие числу месяцев с расходом в данном интервале. Концы этих абсцисс соединяют и таким образом получается полигон, или многоугольник распределения (см. рис. 11.4).

При увеличении числа лет наблюдений и уменьшении интервала ломаная кривая (полигон) в пределе приближается к плавной кривой, которая называется кривой частоты или кривой распределения. Кривая распределения дает наглядное представление о повторяемости различных дебитов.

Для оценки обеспеченности расходов источников можно воспользоваться кривой обеспеченности или продолжительности. Эта кривая получается путем последовательного суммирования кривой частоты. При этом обеспеченность обычно определяется в процентах. Такая кривая дает возможность определить обеспеченность расхода более правильно. Обеспеченности 90 % соответствует расход 1 л/с (см. рис. 11.4).

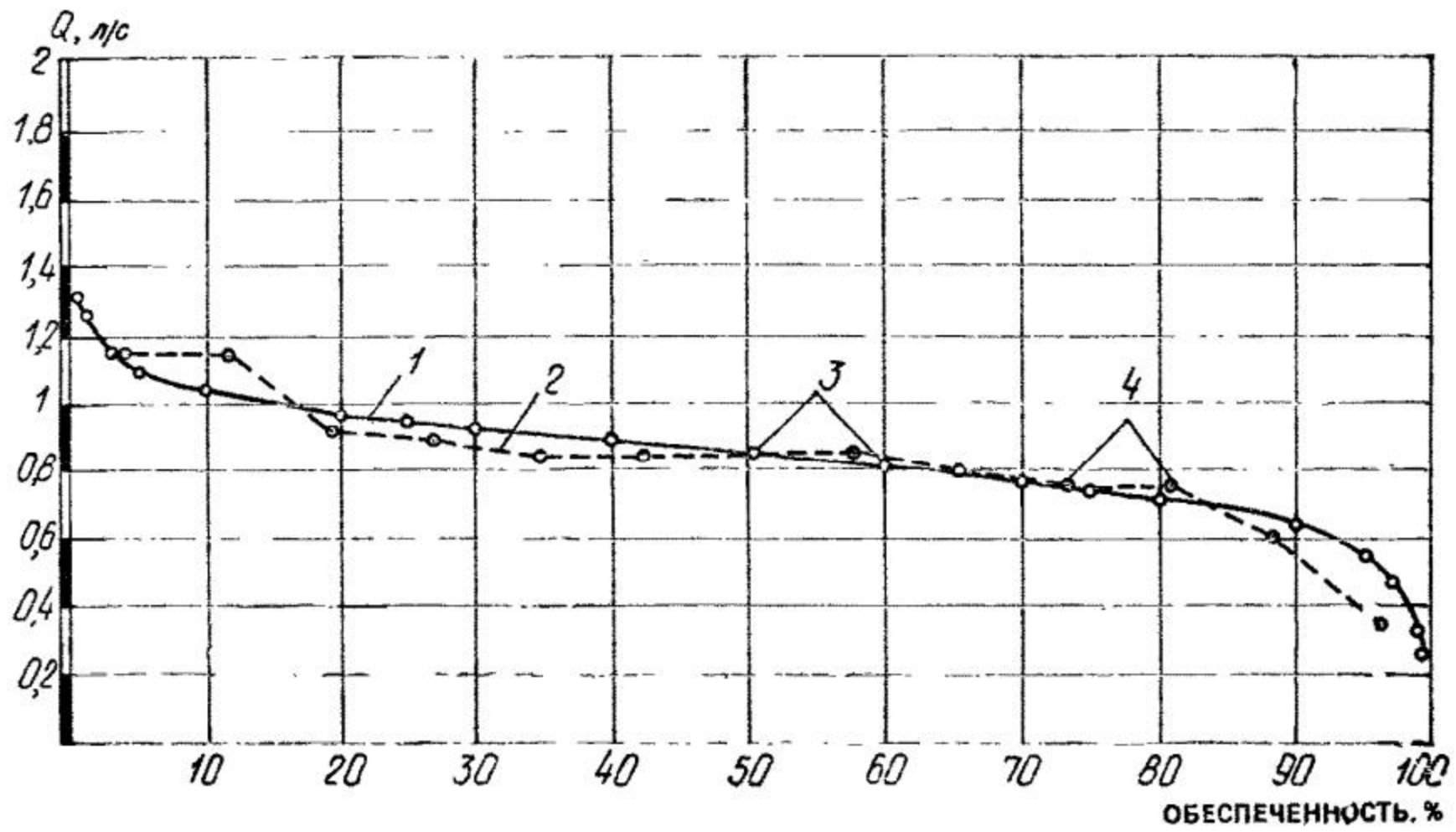


Рис. 11.5. Кривая обеспеченности минимальных дебитов источника

1 — кривая обеспеченности по функциям Шарлье; *2* — кривая обеспеченности по фактическим точкам; *3* — точки вычисления по функциям Шарлье; *4* — точки по фактическим данным

Интервал, л/с	Число месяцев	Интервал, л/с	Число месяцев
10—9,5	2	5—4,5	6
9,5—9	0	4,5—4	2
9—8,5	1	4—3,5	4
8,5—8	0	3,5—3	11
8—7,5	0	3—2,5	8
7,5—7	0	2,5—2	18
7—6,5	1	2—1,5	18
6,5—6	3	1,5—1	38
6—5,5	1	1—0,5	42
5,5—5	1	0,5—0	—
	Итого		156

Со временем изменяются не только распределение и величина метеорологических и гидрологических явлений, но также и гидрогеологические условия, которые определяют питание и условия выхода источника. Таким образом, простая статистика изменения дебита источника не только при коротких, но и при длительных наблюдениях требует анализа отклонения величины и распределения этого дебита. Для оценки закономерности явлений изменения дебита источника можно воспользоваться методами математической статистики.

При определении характеристики дебита источника наибольший интерес представляет изменение норм расхода, годовой нор-

мы расхода, минимального и максимального расходов, а также многолетнее изменение расходов за определенные месяцы.

Среднее арифметическое ряда, или в данном случае норма расхода, определяется формулой

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n}, \tag{11.3}$$

где x_0 — среднее арифметическое; $\Sigma_{i=1}^{i=n} x_i$ — сумма признаков или аргументов, в нашем случае — дебитов; n — число всех объектов, в нашем случае — наблюдений дебитов.

Истинное среднее значение получается только в том случае, если число наблюдений n бесконечно велико. Среднее арифметическое x_0 для ограниченного ряда наблюдений является приближенным, отличающимся от истинного x на величину σ_0. Величина σ_0 называется ошибкой арифметической середины и для средней ошибки симметричного ряда выражается формулой

$$\sigma_0 = \pm \sigma / \sqrt{n}, \tag{11.4}$$

где σ — среднее квадратичное отклонение (стандартная вариация), или средняя ошибка отдельного наблюдения

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - x_0)^2}{n-1}}, \tag{11.5}$$

где n — число наблюдений.

При $n > 30$ в знаменателе формулы (11.3) можно ставить не $n-1$, а n; σ и σ_0 являются именованными числами.

Характеристика вариации в безразмерной величине, т. е. коэффициент вариации C_v, определяется по формуле

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (k_i - 1)^2}{n-1}}, \tag{11.6}$$

где x_i/x_0 обозначено через k; этот коэффициент мы назвали модульным.

Число наблюдений, при которых получается среднее арифметическое с заданной точностью, определяется по формуле

$$n = \frac{10^4 C_v^2}{\sigma_0^2}. \tag{11.7}$$

Для характеристики асимметричности ряда наблюдений служит коэффициент асимметрии

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (k_i - 1)^3}{n C_v^3}. \tag{11.8}$$

При $\Sigma_{i=1}^{i=n} (x - x_0) = 0$ ряд будет симметричен, т. е. $C_s = 0$. Коэффициент асимметрии дает возможность сравнивать ряды с одинаковыми средними арифметическими и разными n и σ.

Следует иметь в виду, что при малом числе наблюдений среднеквадратичная ошибка коэффициента асимметрии получается большой. Так, при $n=10$ ошибка составляет 77,5% величины коэффициента асимметрии, при $n=20$ — 55 % и даже при $n=100$ ошибка будет равна 24,5 %. Формулы для вероятных ошибок, которые возможны для 50 % случаев, будут следующие:

для x_0
$$\Delta x_{50} = \pm 0,67 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \tag{11.9}$$

для σ
$$\Delta \sigma_{50} = \pm 0,67 \frac{\sigma}{\sqrt{2n}}; \tag{11.10}$$

для C_v
$$\Delta C_{v50} = \pm 0,67 \frac{C_v}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 + 2C_v^2}. \tag{11.11}$$

Предельную ошибку можно принять равной учетверенной вероятной. Формулы ошибок (11.9), (11.10) и (11.11) относятся к рядам симметричного вида, поэтому они не отвечают полностью ошибкам в асимметричных рядах.

Для построения теоретической кривой обеспеченности расхода можно воспользоваться функцией распределения Шарлье, которая соответствует общему виду кривой распределения. На рис. 11.6 показано сравнение кривой обеспеченности по функции Шарлье и по фактическим данным. Из этого рисунка видно преимущество изучения обеспеченности по теоретическим кривым (Шарлье) для обеспеченности 80—95 %.

Для исследования зависимости между дебитом источника и метеорологическими, гидрологическими и другими влияющими на него факторами, а также для исследования связи между дебитом источника и дебитом аналога за параллельные периоды наблюдений можно воспользоваться методом корреляций. Коррелятивная зависимость между двумя величинами может выражаться для ряда случаев уравнением прямой регрессии

$$y - y_0 = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - x_0), \tag{11.12}$$

где x_0 и y_0 — среднее арифметическое ряда; r — коэффициент корреляции, являющийся мерой связи между величинами.

При $r=1$ имеет место функциональная связь. Теоретически наличие коррелятивной связи между сравниваемыми явлениями будет иметь место при $r>0,5$. При практических расчетах коррелятивную связь используют при $r>0,7$.

Коэффициент корреляции определяют по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - y)(x_i - x_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (y_1 - y_0)^2 \sum_{i=1}^{i=n} (x_1 - x_0)^2}}. \tag{11.13}$$

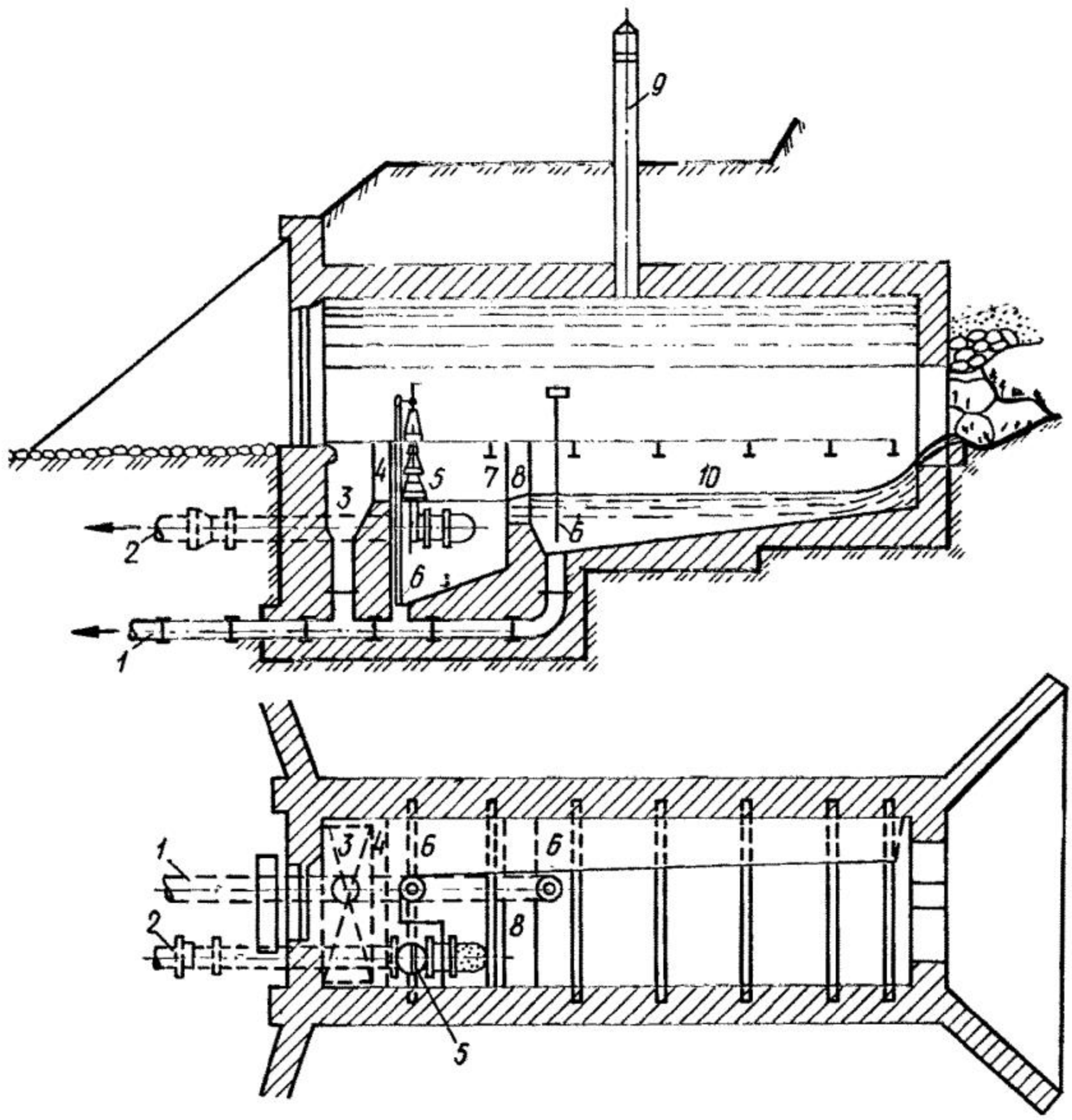


Рис. 11.6. Каптаж нисходящего сосредоточенного выхода источника в виде каптажной камеры

1 — переливная и грязевая труба; *2* — питательная труба; *3* — приемная часть переливной трубы; *4* — водослив для перелива; *5* — задвижка питательной трубы; *6* — грязевые клапаны; *7* — распределительная часть камеры; *8* — общий водослив; *9* — вентиляция; *10* — приемная часть камеры

В формуле (11.12) σ_x и σ_y — стандартные вариации или среднеквадратичные отклонения y и x от их средних — y_0 и x_0.

Стандартные вариации вычисляют по формулам:

$$\sigma_x = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (x_1 - x_0)^2}}{n-1}, \qquad (11.14)$$

$$\sigma_y = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (y_1 - y_0)^2}}{n-1}. \qquad (11.15)$$

Вероятная ошибка коэффициента корреляции вычисляется по формуле

$$\Delta r = \pm 0{,}67 \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}}. \qquad (11.16)$$

Коэффициент $r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ в уравнении (11.12) определяет собой угол наклона прямой регрессии и называется коэффициентом регрессии. В уравнении (11.12) коэффициент регрессии y по x обозначается через R^y/x; коэффициент регрессии x по y — через R^x/y; последний равняется $r\sigma_x/\sigma_y$. В этом случае уравнение регрессии имеет вид

$$x - x_0 = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y - y_0). \qquad (11.17)$$

Коэффициенты регрессии связаны уравнением

$$R^y/x \cdot R^x/y = r^2. \qquad (11.18)$$

При функциональной связи между величинами x и y обе линии регрессии сливаются в одну

$$R^y/x = \frac{1}{R^x/y}. \qquad (11.19)$$

Для установления связи одной переменной с двумя, например y с x_1 и x_2, пользуются соответствующими формулами из математической статистики.

В гидрогеологических явлениях, как и в ряде других, не всегда можно применить прямолинейную корреляцию; в этом случае связь облекается в более сложную формулу криволинейной коррелятивной зависимости. За меру связи такой зависимости принимается величина коррелятивного отношения, вычисление которой довольно сложно. Поэтому для суждения о характере связи при криволинейной корреляции проще построить приближенную кривую графическим путем.

Так как большинство кривых удовлетворяется уравнениями степенных функций, то можно воспользоваться этим свойством, и коррелировать не непосредственно величины, а их логарифмы. Тогда мы получим не криволинейную, а прямолинейную корреляцию, следовательно, уравнение прямой регрессии логарифмической анаморфозы.

Пользоваться анализом связи по уравнениям регрессии желательно при числе членов ряда больше 10; если же число членов будет меньше 10, то следует искать простую графическую связь, в особенности при криволинейной зависимости. При наличии короткого ряда наблюдений построение выводов по методам математической статистики влечет за собой значительные ошибки. В связи с этим весьма важным является расширение периода или ряда наблюдений. Это можно сделать следующими приемами.

Пусть мы имеем короткий период наблюдений за дебитом источника и длинный период наблюдений за метеорологическими элементами (осадки, температура и дефицит влажности), которые определяют в нашем случае питание источника. Вычислим коэффициент корреляции между исследуемой характеристикой дебита источника для имеющегося ряда наблюдений и соответствующими этому ряду метеорологическими элементами. Если связь надежная, то по методу корреляции определяют зависимость характеристики дебита от метеорологического элемента.

При прямолинейной корреляции в общем виде получается уравнение

$$x = ay + b, \tag{11.20}$$

где x — характеристика дебита источника; y — метеорологический элемент; a — коэффициент; b — постоянная.

Уравнение (11.20) есть уравнение прямой регрессии, не проходящей через начало координат. Для частного случая постоянная $b=0$, и тогда мы получим уравнение прямой, проходящей через начало координат

$$x = ay. \tag{11.21}$$

При криволинейной корреляции следует сначала получить уравнение прямой регрессии логарифмической анаморфозы

$$\lg x = a \lg y + b \tag{11.22}$$

и затем от него (потенцированием) переходить к уравнению степенных функций

$$x = cy^a, \text{ где } \lg c = b. \tag{11.23}$$

Таким образом, устанавливается связь между исследуемой характеристикой дебита и метеорологическими элементами. Затем по метеорологическим данным за весь период можно определить искомую характеристику дебита по уравнениям (11.20)—(11.23). Таким образом, переходим от короткого ряда наблюдений к большему. При наличии аналога и длительных за ним наблюдений можно короткий ряд наблюдений исследуемого источника привести к длинному, соответствующему по периоду наблюдений аналогу.

В ряде случаев источники возникают в результате подпора потока грунтовых вод.

Общим для всех источников, образовавшихся в результате подпора грунтового потока, является полное перегораживание его, частичное или уменьшение водопроводящих свойств водоносного слоя. Последнее явление наблюдается, например, в грунтовых потоках конусов выноса, где ниже по потоку отлагаются глинистые частицы и образуются малопроницаемые и водонепроницаемые прослои.

Каптаж источников, образовавшихся в результате подпора грунтового потока, несколько видоизменяется в зависимости от гидрогеологических условий. Например, при наличии подпора каптаж источника целесообразно делать в виде дренажных труб, галерей, горизонтального водозабора или в виде колодцев.

Оценка эксплуатационных запасов нисходящих источников сводится к определению степени обеспеченности дебита при эксплуатации источника и в некоторых случаях также к оценке захвата подземного потока. Это делается на основании анализа гидрогеологических условий и тех изменений, которые произойдут при устройстве каптажа источника, а также анализа по данным наблюдений за изменчивостью дебита.

В оценку эксплуатационных запасов источников для любого периода должны входить анализ гидрогеологических условий и соображения о влиянии устройства каптажа. Затем анализируют наблюдения за изменчивостью дебита. Методику оценки изменчивости дебита выбирают в зависимости от сроков и числа наблюдений за дебитом источника, от элементов, которые влияют на дебит, от наличия аналогов, а также в зависимости от требуемой точности оценки, которая, в частности, определяется потребностью в воде.

Наиболее упрощенной оценкой эксплуатационных запасов источников является составление таблиц по дебитам и хронологических графиков с выборкой минимальных и максимальных дебитов. Такая оценка является приближенной. При длительном ряде наблюдений составляются эмпирические кривые распределения и обеспеченности; такой метод дает возможность более точно оценить изменчивость и обеспеченность дебитов источников.

Построение эмпирической и теоретической кривых обеспеченности дает возможность математически исследовать вероятность различной обеспеченности дебита.

Более углубленный анализ изменчивости дебитов источников получают при сопоставлении данных наблюдений за дебитами с данными наблюдений по элементам, влияющим на дебит (осадки, влажность, гидрогеологические элементы); это сопоставление особенно целесообразно применять при коротком ряде наблюдений за дебитами и длинном ряде наблюдений за элементами, от которых зависит изменение дебитов источников. Такой анализ можно делать по методу корреляций и по методу расширенного периода наблюдений. При наличии аналога с длинным рядом наблюдений целесообразно оценить изменчивость дебита по методу аналогии аналитическим и графическим способами.

При расчете производительности восходящих источников нужно сначала проанализировать гидрогеологические условия, на основании чего можно будет сделать прогноз об увеличении естественного дебита, а затем решить задачу о закономерностях увеличения дебита при различных понижениях уровня воды. Эта задача решается так.

По данным о дебите при различных понижениях строят кривую дебита или составляют уравнение дебита. При прямолинейной зависимости дебита Q от понижения S можно применять уравнение

$$Q = qS, \tag{11.24}$$

где q — удельный дебит.

При параболической зависимости применяется уравнение

$$S = aQ + bQ^2, \tag{11.25}$$

где a и b — параметры уравнения.

Для степенных функций в общем виде используется уравнение

$$S = aQ^c, \tag{11.26}$$

где a и c — постоянные для искомой зависимости, или в виде логарифмической анаморфозы

$$\lg S = c \lg Q + b, \tag{11.27}$$

где $b = \lg a$.

Для построения кривых дебита или составления уравнений необходимо иметь не менее трех точек. При гидрогеологических условиях, когда при выходе источника часть воды теряется на подземное растекание, построение кривых дебита и уравнений следует вести с учетом изменения количества растекащейся воды. Необходимо иметь в виду, что характер связи дебита с понижением уровня может меняться в зависимости от меняющейся величины расхода данного источника. Поэтому принятое уравнение может быть справедливо в пределах каких-то понижений и удовлетворять с меньшей степенью точности или совсем не удовлетворять за пределами этих понижений. Более строго расчеты восходящих источников с понижением уровня выхода на поверхность следует делать как для подземных напорных вод.

Некоторые восходящие источники имеют довольно равномерный дебит. Однако у многих из них наблюдаются сезонные, многолетние, периодические и другие колебания дебита. Многолетние колебания дебита восходящих источников связаны с многолетними климатическими и гидрологическими изменениями. Более строго расчеты восходящих источников с понижением уровня воды у выхода на поверхность следует делать как для напорных вод.

Сезонные колебания дебита отмечаются в ряде источников. Например, восходящий пресный источник из верхнесенонских мелов в Белгороде имеет сезонные колебания уровня около 1 м; это дает в естественных условиях коэффициент неравномерности дебита порядка двух *.

---

* Источник каптирован шахтным колодцем в виде резервуара, из которого откачивается вода. Уровень замеряют в этом резервуаре.

Колебания атмосферного давления влияют на изменение уровня и содержание газа в восходящих источниках, а эти обстоятельства, очевидно, влияют на дебит этих источников. На дебит восходящих источников оказывают влияние и другие факторы. Например, на дебит упомянутого выше источника в Белгороде влияет подпор р. Северский Донец.

Расчет обеспеченности эксплуатационных запасов восходящих источников, которые полностью дренируют водоносный горизонт, можно делать как для нисходящих источников. Для восходящих источников, которые являются выходом части воды подземного потока, анализ обеспеченности эксплуатационных запасов, кроме использования методики, применяемой для нисходящих источников, следует делать по методам, применяемым для расчетов подземных напорных вод.

11.2. Характеристика воды источников

Состав воды нисходящих источников из рыхлых отложений (песков) обычно изменяется мало. Бóльшие колебания состава воды наблюдаются чаще в источниках, выходящих из трещиноватых и закарстованных пород. Так, карстовый источник из известняка в истоках р. Белой (район Нальчика) во время весеннего снеготаяния в горах Кавказа дает очень мутную воду со значительным бактериальным и химическим загрязнением. Некоторые источники в районе Кисловодска, выходящие из трещиноватых и закарстованных известняков и находящиеся близко от области питания, во время дождей также имеют мутную воду с показателями загрязнения. Однако когда было зацементировано несколько ближайших карстовых воронок, то помутнение воды во время дождей почти прекратилось.

Наибольшие колебания температуры воды и ее состава обычно наблюдаются в источниках, имеющих область питания вблизи от зоны разгрузки, и приурочены к трещиноватым и карстовым известнякам: в воде таких источников во время снеготаяния и больших дождей встречаются не только микроорганизмы, но также видимые невооруженным глазом растительные и животные организмы. Вопрос об изменчивости состава нисходящих источников решается на основании сопоставления комплекса гидрогеологических условий с физико-химическими и биологическими (включая бактериологические) анализами, полученными при наблюдениях за режимом подземных вод.

Многие восходящие источники обладают значительным постоянством химического состава подземных вод. Например, по Кейльгаку, минерализация висбаденского минерального источника Кохбруннен за 36 лет изменилась с 8,262 до 8,241 г/кг, т. е. всего на 0,26 %. Однако в ряде источников наблюдаются колебания состава воды. Например, общая жесткость воды напорного пресного источника из верхнесенонского мела в Белгороде колеблется от

7,3 до 9,1 мг-экв, что составляет около 18%. В том же источнике колебания хлор-иона составляют более 50%. Последнее объясняется, по-видимому, примешиванием грунтовых вод.

11.3. Каптаж источников

Гидрогеологические условия выхода нисходящих и восходящих источников различны. В связи с этим несколько различны и конструкции их каптажей. Однако некоторые принципы каптажей восходящих и нисходящих источников являются общими. Кроме того, между нисходящими и восходящими источниками есть промежуточные типы, что, конечно, влияет на выбор конструкции каптажей. При устройстве каптажей всех источников следует учитывать следующие общие основные положения.

1. Подземную воду следует захватить каптажем до выхода на поверхность, чтобы сохранить ее ценные свойства и предохранить от загрязнения. Такое требование является второстепенным при использовании источников для орошения и в некоторых других случаях. Для минеральных вод особенно важно сохранить не только химические, бактериологические, но и физические свойства, например для газированных, термальных и прочих источников.

2. Каптаж по возможности должен перехватить полностью источник с его дериватами и направить поток источника в приемную часть, которая часто конструктивно оформляется в виде каптажной камеры.

3. Каптаж должен быть рассчитан на пропуск не только минимального, но и максимального расхода, в частности путем выпуска через переливную трубу.

4. Каптаж, как правило, должен быть устроен таким образом, чтобы не создавался подпор естественного уровня и чтобы, следовательно, источник не мог уйти по другим путям.

Каптаж нисходящих источников при сосредоточенном выходе принимают в виде каптажной камеры (рис. 11.6). В случае если источник выходит по подошве водоупорной породы в виде нескольких или многих струй, например из рыхлых отложений, захват выполняют горизонтальным водозабором в виде дренажных труб или галереи, затем вода поступает в камеру или в более простую распределительную камеру. Водослив (см. рис. 11.6) должен пропускать максимальный расход источника без подпора естественного уровня. В зависимости от гидрогеологических условий конструкция каптажей нисходящих источников изменяется.

Путем рационального каптажа дебит источников может быть увеличен. Например, дебит каптажа в Нанси вследствие подпора увеличен с 6—7 до 60 л/с. Однако следует иметь в виду, что подпор источника дает возможность повысить минимум расхода, но это мероприятие следует проводить лишь после тщательного гидрогеологического изучения, так как источник при подпоре может

найти выход в другом месте, тогда вместо повышения минимума расхода каптаж останется без воды.

Некоторые наблюдения показали, что значительная расчистка выходов ключей и понижение естественного уровня влекут за собой в ряде случаев снижение минимумов расхода источников. Такое явление наблюдалось на источниках Кайзербруннен и Стиксеншейн, расположенных вблизи Вены. Однако, например, известно, что при наличии дериватов снижение бытового уровня у главного выхода источника повышает в ряде случаев как общий расход источника, так и минимум его.

В основном каптаж восходящих источников следует делать обязательно с учетом условий выхода их на поверхность земли. Например, в условиях сосредоточенного выхода на поверхность земли (см. рис. 11.2) каптаж целесообразно выполнять в виде шахтного колодца-камеры, оборудованного приемной или сбросной трубой. В условиях выхода источника (см. рис. 11.3) приведенная схема каптажа может быть выполнена так же, как указано выше, но при этом производительность его будет близка к естественному выходу. Для увеличения производительности, особенно в периоды низкого расхода естественного выхода, схему каптажа следует проектировать в виде скважин или углубленных шахтных колодцев. В этом случае расчет выполняют с учетом дренирования водоносного горизонта, как для подземных вод (см. рис. 11.2).

ГЛАВА 12. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНАХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

В условиях многолетней мерзлоты подземные воды, используемые для водоснабжения, подразделяют на надмерзлотные, приуроченные к таликам под руслами и поймами рек (подрусловые, пойменные, подозерные), залегающие на толще мерзлоты; межмерзлотные, залегающие внутри толщи мерзлых пород; подмерзлотные, залегающие под толщей мерзлых пород. Источники водоснабжения в северной строительно-климатической зоне должны обеспечивать забор воды с максимально высокой температурой для удешевления ее подогрева, должны быть расположены вблизи потребителя и обеспечивать запас воды, достаточный для водоснабжения с циклом потерь на льдообразование, испарение и промерзание. Использование подземных вод в северных районах более предпочтительно в сравнении с поверхностными. Возможность получения надмерзлотных таликовых вод должна реализовываться в большинстве регионов, но при обеспечении рациональных сооружений для забора воды и специальных мероприятий по регулированию стока и запасов подрусловых вод. Запасы подрусловых надмерзлотных вод и размеры таликов должны оцениваться на начало их пополнения с момента оттаивания промороженнных русловых отложений.

Вследствие сложности защиты скважин от промерзания, трудности обработки воды с высокой степенью минерализации, больших затрат на бурение разведочно-эксплуатационных скважин при использовании подмерзлотных вод, следует ориентироваться на использование надмерзлотных и межмерзлотных подземных вод.

Особую важность при проектировании водозаборных сооружений представляют данные о гидравлической связи между русловыми и подрусловыми водами, величине водопроницаемости, приведенной к расчетной температуре, сведения об эксплуатации водозаборов в аналогичных условиях в течение не менее чем 2 лет, данные о наличии и размерах таликов, области и характере их питания и сработки с учетом возможных изменений мерзлотно-грунтовых условий, характеристика образования наледей, данные о возможности изменения качества воды и гидрогеологических условий в связи с эксплуатацией водозаборных сооружений, особенно при оттаивании мерзлого и промерзании талого грунта.

Межмерзлотные и подмерзлотные воды забирают посредством скважин, оборудованных насосами типа ЭЦВ. Каптаж надмерзлотных вод более предпочтителен шахтными колодцами, дренами и галереями, более надежными по сравнению со скважинами в отношении промерзания. При сложении берегов рек, островов или русел рек высокопроницаемыми породами эффективно применение инфильтрационных водозаборов. Участок расположения инфильтрационного водозабора выбирают в зоне минимально заиленных русловых отложений, не обмерзающих донным льдом и с наибольшей площадью инфильтрации в русле.

Тип водозабора на перемерзающих реках выбирают с учетом сработки запасов грунтовых вод и промерзания талика с момента отсутствия стока до оттаивания промороженного грунта в русле реки. Для внутригодового перераспределения и увеличения эксплуатационных запасов надмерзлотных вод Ю. В. Якунин рекомендует применять подачу воды в пласт выше по потоку от водозабора горячих вод систем охлаждения промышленных предприятий и электростанций; оттаивание многолетнемерзлых грунтов речной водой с применением фильтрационно-дренажного способа, устройство неглубоких перемычек из суглинка и глины, прорезающих верхнюю, наиболее водопроницаемую часть аллювия, устройство временных простейших запруд, располагаемых несколько выше или в створе каптажных сооружений, устройство мерзлотных поясов, шпунтовых стенок и висячих перемычек из суглинка и глины, прорезающих верхнюю, наиболее проницаемую часть аллювия ниже водозаборных сооружений (при мощности водоносного талика 6—10 м), утепление водоносного талика снегом выше водозабора, его искусственное пополнение. Определенный интерес представляет искусственное пополнение надмерзлотных вод через инфильтрационные бассейны с использованием в качестве источника пополнения таяния снега.

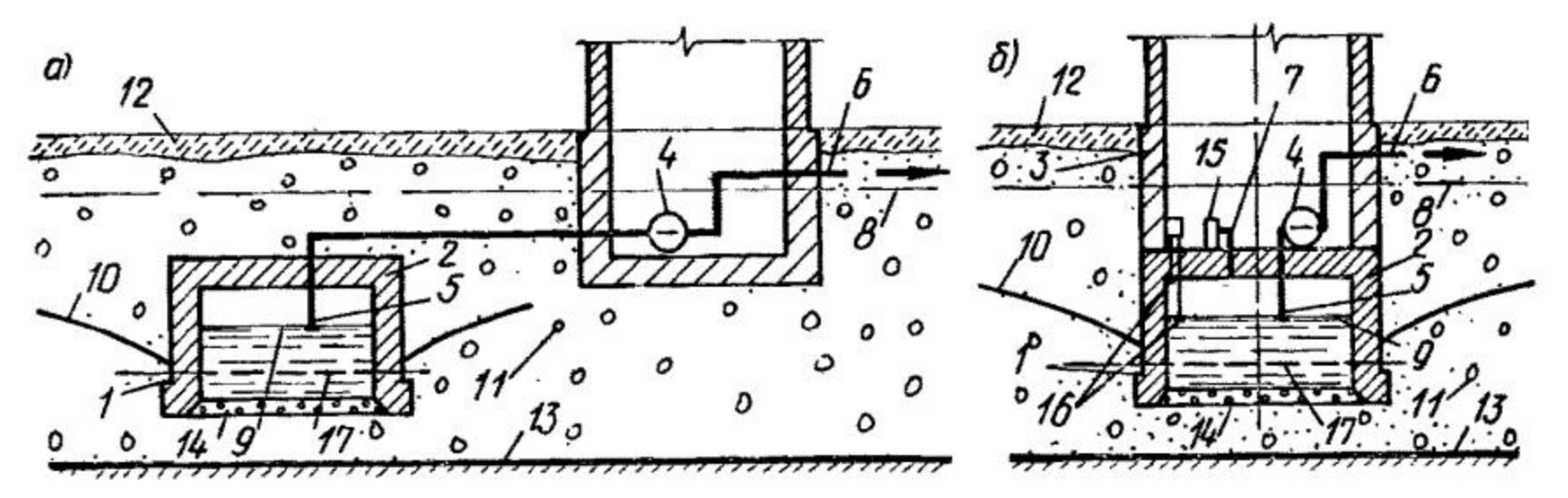


Рис. 12.1. Конструктивные схемы несовершенных шахтных колодцев

а — обычного шахтного колодца; *б* — шахтного вакуум-колодца: *1* — воздухонепроницаемые стенки; *2* — перекрытие водосборной камеры; *3* — бетон или железобетон; *4* — центробежный насос с горизонтальным валом; *5* — всасывающий трубопровод; *6* — напорный трубопровод; *7* — труба для воздуха; *8* — статический уровень грунтовых вод; *9* — уровень в водосборной камере; *10* — зеркало грунтовых вод; *11* — галечниковый грунт; *12* — супесь; *13* — водоупор; *14* — фильтр; *15* — вакуум-насос; *16* — датчики уровня; *17* — пьезометрический уровень воды в водосборной камере

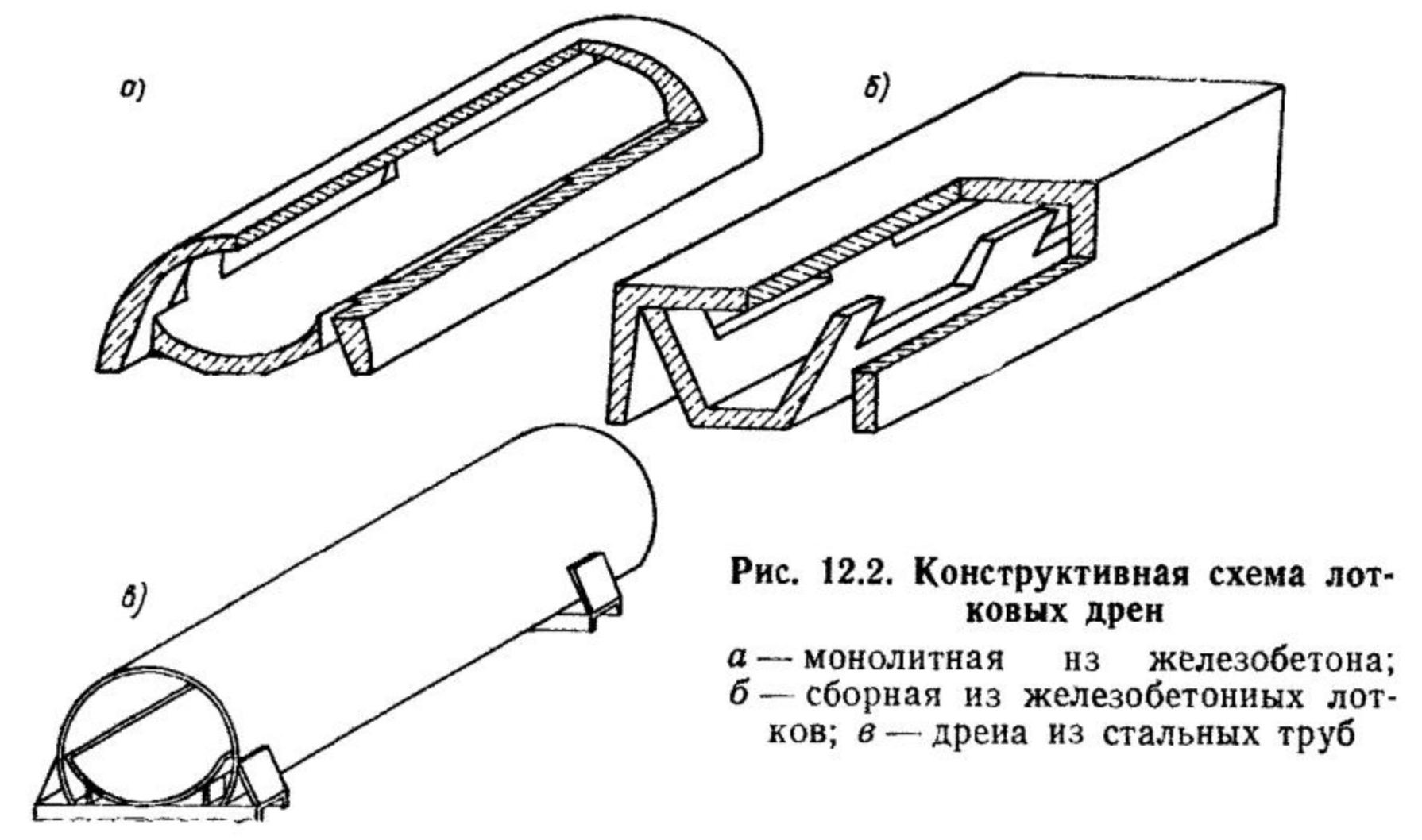


Рис. 12.2. Конструктивная схема лотковых дрен

а — монолитная из железобетона; *б* — сборная из железобетонных лотков; *в* — дрена из стальных труб

В северной строительно-климатической зоне для устройства павильона над скважинами освоено производство металлических контейнеров, возможно их устройство из блоков и панелей на специальных грунтовых подушках при обязательном отводе талых и дождевых вод с площадок насосных станций. Конструкция оголовков скважин кроме обеспечения их герметичности должна фиксировать устья с учетом возможности вертикального перемещения при воздействии сил морозного пучения грунтов и при просадках, связанных с их сезонным протаиванием.

Забор подрусловых вод инфильтрационными водозаборами позволяет решать проблемы водоснабжения населенных мест и про-

мышленности в северных регионах при большой водопроницаемости водоносных пород и мощности пласта до 20 м. В этом случае при устройстве шахтного колодца ложе его нижней кромки при приеме воды через дно должно быть расположено на расстоянии 0,5—0,7 радиуса колодца. При мощности пласта больше 20 м допускается применение шахтных вакуум-колодцев.

Колодцы больших диаметров устраивают из монолитного железобетона, а при диаметре 3 м и менее применяют железобетонные кольца. В шахтных колодцах эффективность отбора воды возрастает при создании вакуума в надводной части водосборных камер (рис. 12.1). Вакуум-насосы для откачки воздуха из водосборной камеры можно устанавливать в колодце на любой отметке. Работа вакуум-насоса автоматизируется по уровню воды в водосборной камере, где устанавливают два датчика уровня для управления работой насосов и датчик сигнала аварийного уровня, работающие от различных источников питания.

Откачку выделившегося из воды воздуха при хорошо загерметизированной водосборной камере можно вести непрерывно эжектором или с помощью трубопровода, подсоединенного к сифону или всасу насоса.

В северных районах при заборе подрусловых вод хорошо зарекомендовали себя, особенно в условиях полностью или частично перемерзающих рек, подрусловые дрены и галереи.

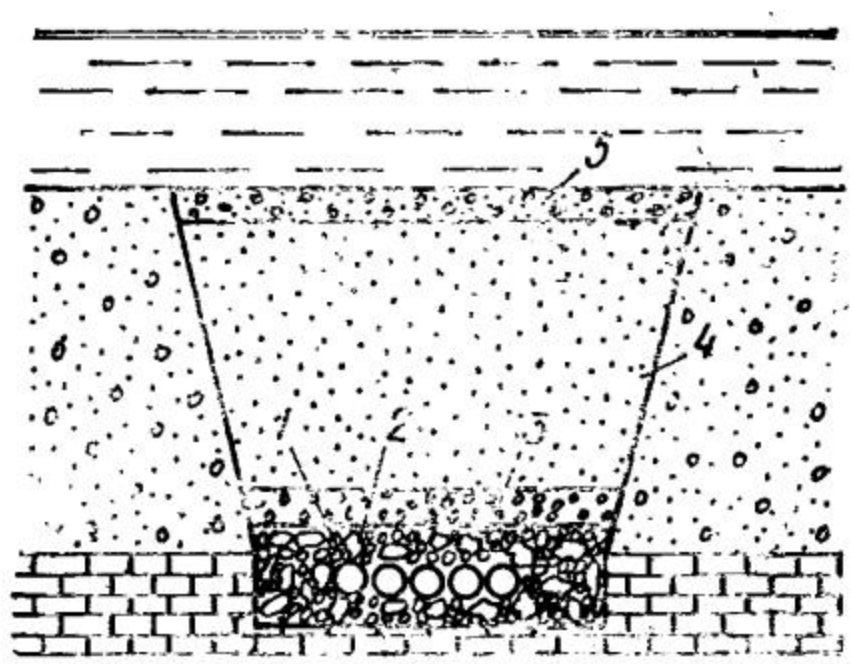
В водоносных горизонтах мощностью более 2 м в качестве водоприемного элемента водозабора целесообразно применять лотковые дрены из железобетонных, стальных или деревянных корытообразных элементов, имеющих глухие стенки и установленных открытым днищем на фильтрующее основание. Лотковая дрена может быть выполнена в виде цельного элемента (рис. 12.2, *а*), состоящего из глухого свода, плоского днища с опорными гранями и водозаборных окон, выходящих в водоотводящую полость. Дрена может состоять из двух элементов: водоотводящего лотка, воспринимающего часть нагрузки от грунта и водоприемного лотка (рис. 12.2, *б*). В высокопроницаемых грунтах и при укладке дрены под русло можно применять дрену из стальной трубы (рис. 12.2, *в*).

В водоносных отложениях мощностью менее 2 м применяют плоскую дрену, выполненную из перфорированных труб, уложенных в ряд (рис. 12.3) на фильтрующее основание толщиной 0,15—0,26 м. Сверху над трубами отсыпается обратный фильтр. В неоднородных по зерновому составу грунтах при коэффициенте неоднородности более 50 горизонтальные водозаборы устраивают методом вымораживания с минимальным нарушением естественного сложения пород или с непрерывной откачкой в процессе строительства траншей для устройства дрены.

При заборе воды должна быть обеспечена защита водоприемных устройств от перемерзания, для чего предусматривают: максимальное заглубление водоприемных устройств (колодцев, дрен)

Рис. 12.3. Схема устройства плоской дрены

1 — перфорированная труба; *2* — щебень (гравий); *3* — крупнозернистый песок; *4* — среднезернистый песок; *5* — гравийно-галечниковый грунт



в водоносные отложения; двойные крышки люков смотровых и водоприемных колодцев; тепляки над водоприемными шахтами; утепление колодцев на дренах и галереях, непосредственно самих дрен и галерей торфом, льдом, снегом; создание мощных фильтрующих обсыпок вокруг дрен (галерей), проходящих через мерзлые берега, для обводнения и утепления участков берегов вблизи водозаборных устройств; утепление русел рек и уменьшение толщины льда путем снегозадержания, создание искусственных наледей, покрытие пористым льдом при дальнеструйном дождевании; электрообогрев водоприемных устройств; сброс отработанной подогретой воды, пара.

Для предотвращения замерзания воды в стволах скважин необходимо обеспечивать непрерывную откачку, даже если для этого приходится сбрасывать часть отбираемого расхода в водоносный пласт при перерывах в откачке, эпизодической подачей в скважину теплой воды или пара, обогревом линейными источниками тепла, в том числе электрокабелем. Для обогрева скважин применяют геофизические электрокабели, работающие в режиме нагревательных элементов. Минздравом СССР для обогрева скважин разрешены геофизические кабели марок КТШ-03, КТШ-06, КТО-1, КСОП, КПКТ-2, КТБФ-6.

Конец греющего кабеля опускают на 2—3 м ниже нижней границы мерзлоты. Режим включения электрообогревательного кабеля должен быть согласован с режимом откачки: при работе насоса греющий кабель отключается, при остановке насоса и снижении температуры воды в скважине ниже допустимой — включается.

При проектировании насосных станций и резервуаров в северной строительно-климатической зоне предусматривают максимальную блокировку их с тепловыми пунктами по подогреву воды, с диспетчерско-тепловыми квартальными узлами, совмещение насосных станций с резервуарами чистой воды, с очистными сооружениями, размещение в одном помещении насосов различного назначения: хозяйственно-противопожарного, циркуляционного, технологического и др.

Арматура на всасывающих и напорных линиях насосных станций должна быть расположена в отапливаемых помещениях или насосных станциях. Для ускорения строительства рекомендуется проектировать насосные станции и строительную часть резервуаров из укрупненных элементов заводского изготовления в комплектно-блочном исполнении.

ГЛАВА 13. ИСКУССТВЕННОЕ ВОСПОЛНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (ИВПВ)

13.1. Принципиальные схемы ИВПВ

Искусственное восполнение запасов подземных вод позволяет увеличить производительность действующих водозаборов, создать их принципиально новые типовые компоновки, обеспечивающие значительное сокращение площадей отчужденных сельскохозяйственных земель, а также принимать рациональные решения при проектировании зон санитарной охраны водозаборов.

Метод ИВПВ позволяет решить ряд важных технических задач в области хозяйственно-питьевого водоснабжения, ирригации, обводнения пастбищ, защиты водоносных горизонтов от загрязнения и засоления и т. д. Кроме увеличения запасов намечаемого к эксплуатации водоносного горизонта за счет вод поверхностных источников или другого водоносного горизонта, метод ИВПВ дает возможность увеличить производительность действующих водозаборов подземных вод, а также улучшить качество как поверхностных вод, так и вод эксплуатационного горизонта. В районах с засушливым климатом метод ИВПВ обеспечивает создание подземных водохранилищ, защищенных от испарения.

Возможность искусственного пополнения подземных вод определяется наличием источника пополнения и качеством воды, гидрогеологическими и климатическими условиями, особенностями строительства и эксплуатации инфильтрационных сооружений. Наиболее целесообразно осуществлять искусственное пополнение запасов подземных вод в районах развития однородных в разрезе безнапорных водоносных горизонтов при небольшой мощности слабопроницаемых покровных отложений.

В состав сооружений ИВПВ входят сооружения для забора воды из источника пополнения, предварительной подготовки воды, системы подачи ее на инфильтрационные сооружения, собственно водозабора подземных вод и устройства для последующей их подготовки перед подачей потребителю. Основная особенность системы ИВПВ заключается в наличии инфильтрационных сооружений, которые разделяются на два основных типа: открытые (бассейны, каналы, площадки и др.) и закрытые (скважины, колодцы, галереи).

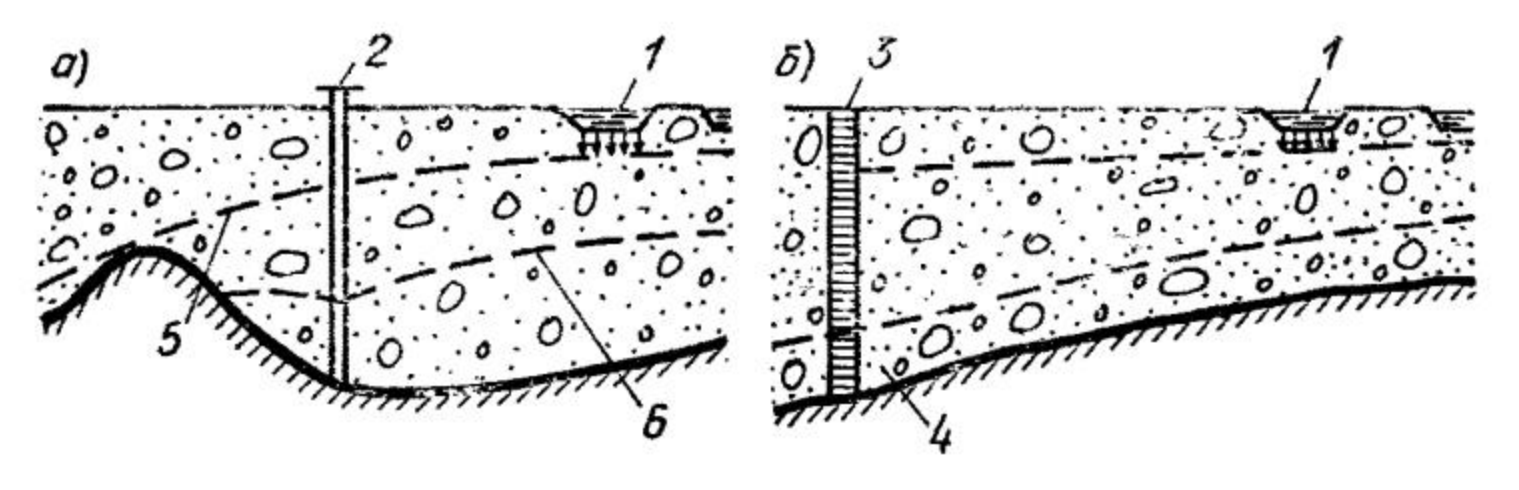


Рис. 13.1. Схемы подземных водохранилищ

а — огражденное естественным водонепроницаемым массивом; *б* — с подземной плотиной: *1* — бассейн; *2* — водозаборная скважина; *3* — диафрагма; *4* — водосборная галерея; *5, 6* — уровни подземных вод при полном заполнении и сработке водохранилища

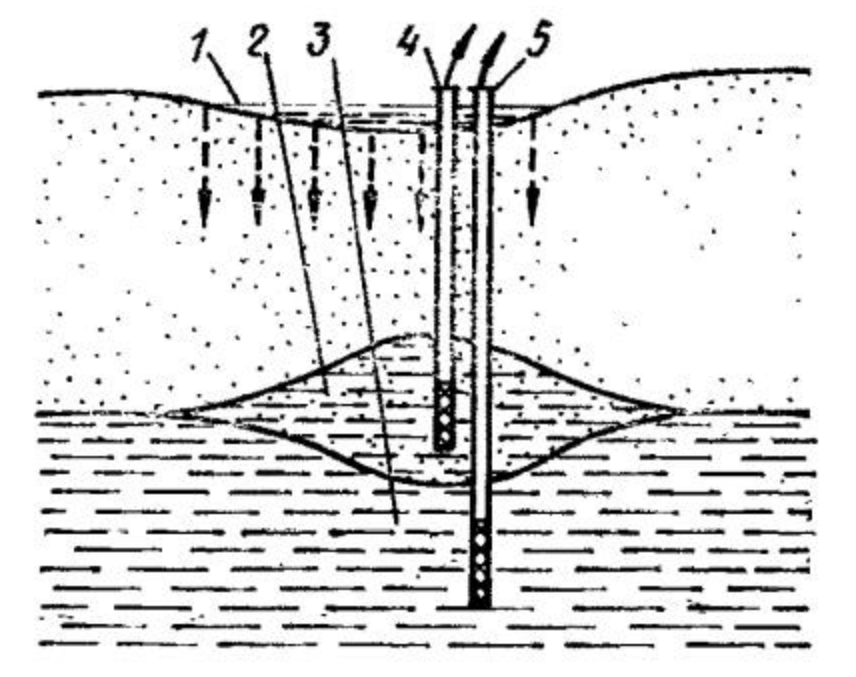


Рис. 13.2. Схема создания и использования линз пресных вод

1 — такыр; *2* — линза пресной воды; *3* — соленые воды; *4* — водозабор; *5* — скважина, откачивающая соленую воду

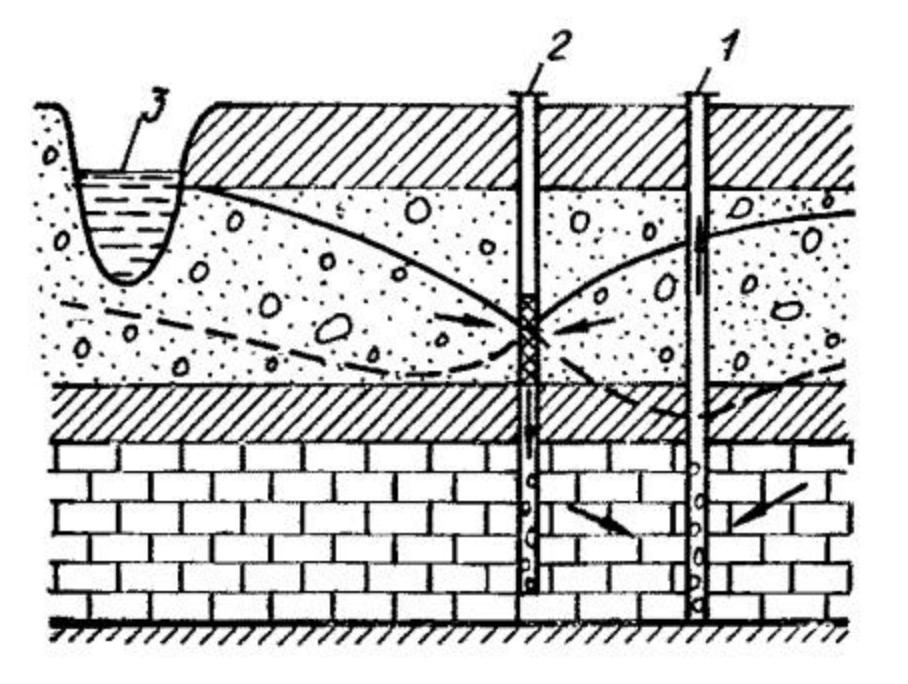


Рис. 13.3. Схема искусственного пополнения нижнего (эксплуатируемого) напорного водоносного горизонта за счет верхнего (в который происходит фильтрация из реки)

1 — водозаборная скважина; *2* — дренажно-поглощающая скважина; *3* — река

Целесообразность применения того или иного вида инфильтрационных сооружений определяется гидрогеологическими, климатическими условиями участка работ, качеством воды в источнике пополнения, наличием свободных площадей земель. Инфильтрационные сооружения могут быть непрерывного и периодического действия.

Наиболее распространенная типовая схема ИВПВ представляет собой один или несколько инфильтрационных бассейнов и водозабор подземных вод из скважин с одной или обеих сторон бассейна. На рис. 13.1 представлены схемы подземных водохранилищ, устраиваемых при наличии естественных выступов в водоупорном основании или искусственно создаваемых непроницаемых завес (барражей). Такого рода схема пополнения запасов подзем-

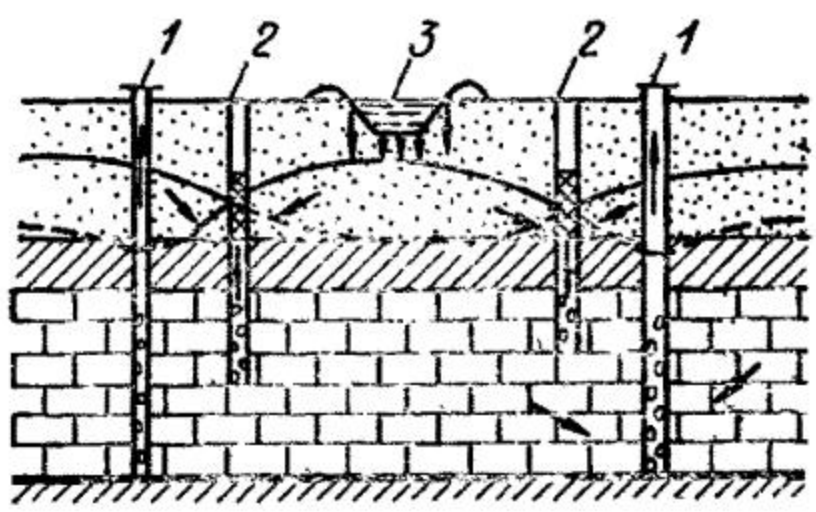


Рис. 13.4. Схема искусственного пополнения нижнего напорного водоносного горизонта за счет верхнего, но с обогащением последнего через открытые инфильтрационные сооружения

1 — водозаборная скважина; *2* — дренажно-поглощающая скважина; *3* — бассейн

ных вод наиболее эффективна в водоносных горизонтах речных долин, при значительных градиентах потока подземных вод и неравномерном во времени выпадении атмосферных осадков; являющихся основным источником питания подземных вод. Создание подземных барражей в указанных условиях затрудняет сток подземных вод и обеспечивает существенное увеличение их запасов, которые можно использовать в засушливые периоды для орошения и других целей.

На рис. 13.2 показан пример создания линз пресных вод в водоносных горизонтах с подземными водами повышенной минерализации. Такую схему успешно применяли при организации линз пресных вод в Туркмении. При использовании в схемах ИВПВ закрытых инфильтрационных сооружений в качестве последних наиболее широко применяют скважины или шахтные колодцы. Различают поглощающие скважины, работающие в режиме свободного налива, нагнетательные скважины, в которые предусматривается закачка воды, и дренажно-поглощающие скважины: ими дренируют неэксплуатируемые верхние водоносные горизонты, воды которых переводятся в нижезалегающий эксплуатируемый водоносный горизонт. Верхний водоносный горизонт при этом может пополняться фильтрацией речных вод (рис. 13.3) или из открытых инфильтрационных сооружений (рис. 13.4).

Искусственное пополнение с использованием подземных вод верхнего горизонта иногда осуществляют в зонах распространения многолетнемерзлых пород. При этом в летне-осенний сезон скважины или колодцы забирают надмерзлотные, таликовые воды, которые можно частично использовать для водоснабжения, а частично закачивать в подмерзлотный водоносный горизонт. В зимне-весенний период при полном промерзании надмерзлотных вод и поверхностного водоносного источника воду отбирают из подмерзлотного комплекса.

При кратковременном (до 1—1,5 мес) сроке магазинирования подземных вод пресные воды можно накапливать в водоносных пластах с солеными водами. В этом случае нагнетательную скважину после некоторого периода магазинирования пресных вод в водоносном пласте с солеными водами используют в качестве водозаборной.

13.2. Открытые инфильтрационные сооружения

Открытые инфильтрационные сооружения (I тип ИВПВ) используют, как правило, для пополнения запасов подземных вод первого от поверхности земли водоносного горизонта, не имеющего покровных отложений или перекрытого слоями слабопроницаемых пород малой мощности. Наибольшее применение в системах ИВПВ нашли инфильтрационные бассейны. Инфильтрационные каналы по сравнению с бассейнами имеют большую длину и число их в составе установки обычно мало. Инфильтрационные площадки отличаются от бассейнов малой глубиной. Канаво-бороздовые инфильтрационные сооружения сходны с соответствующими ирригационными водораспределительными системами. В качестве открытых инфильтрационных сооружений можно также использовать естественные и искусственные понижения рельефа (овраги, балки, староречья, карьеры, пруды), а также русла временных и постоянных водотоков. Инфильтрационные бассейны имеют, как правило, прямоугольную форму в плане и трапецеидальное (реже прямоугольное) поперечное и продольное сечение.

На крупных установках ИВПВ применяют бассейны шириной по дну 15—30 м, длиной 200—400 м и глубиной 1,5—2 м (реже до 3—4 м). При наличии слабопроницаемых покровных отложений днища бассейнов врезают в хорошо фильтрующие породы на глубину не менее 0,5 м. Общая глубина бассейна от днища до верха откоса должна превышать глубину его наполнения не менее чем на 0,5 м. Инфильтрационные бассейны устраивают без загрузки дна (рис. 13.5, *а*), с песчаной загрузкой дна (рис. 13.5, *б*), с гравийной загрузкой дна (рис. 13.5, *в*), с загрузкой дна и укладкой дренажных труб (рис. 13.5, *г*).

Песчаную и гравийную загрузку дна предусматривают при устройстве бассейнов в гравийно-галечниковых отложениях. Толщина загрузки обычно составляет 0,5—0,8 м. Рабочие чертежи входных узлов опытных и опытно-производственных инфильтрационных бассейнов трех типоразмеров разработаны Союзводоканалпроектом и могут быть рекомендованы для практического использования.

Рабочий цикл бассейна включает период затопления его дна, наполнения бассейна до предельных отметок при постоянном инфильтрационном расходе, сохранения неизменного уровня при постепенном уменьшении инфильтрационного расхода, опорожнения бассейна и период его чистки. Предельная глубина воды в бассейне определяется его конструкцией. Для бассейнов в среднезернистых и крупнозернистых песках с коэффициентами фильтрации от 10—20 до 60—80 м/сут максимальные скорости инфильтрации обычно находятся в пределах 1—3 м/сут, бассейны в мелкозернистых песках и супесях характеризуются минимальными скоростями инфильтрации — до 0,5 м/сут. В гравийно-галечниковых породах

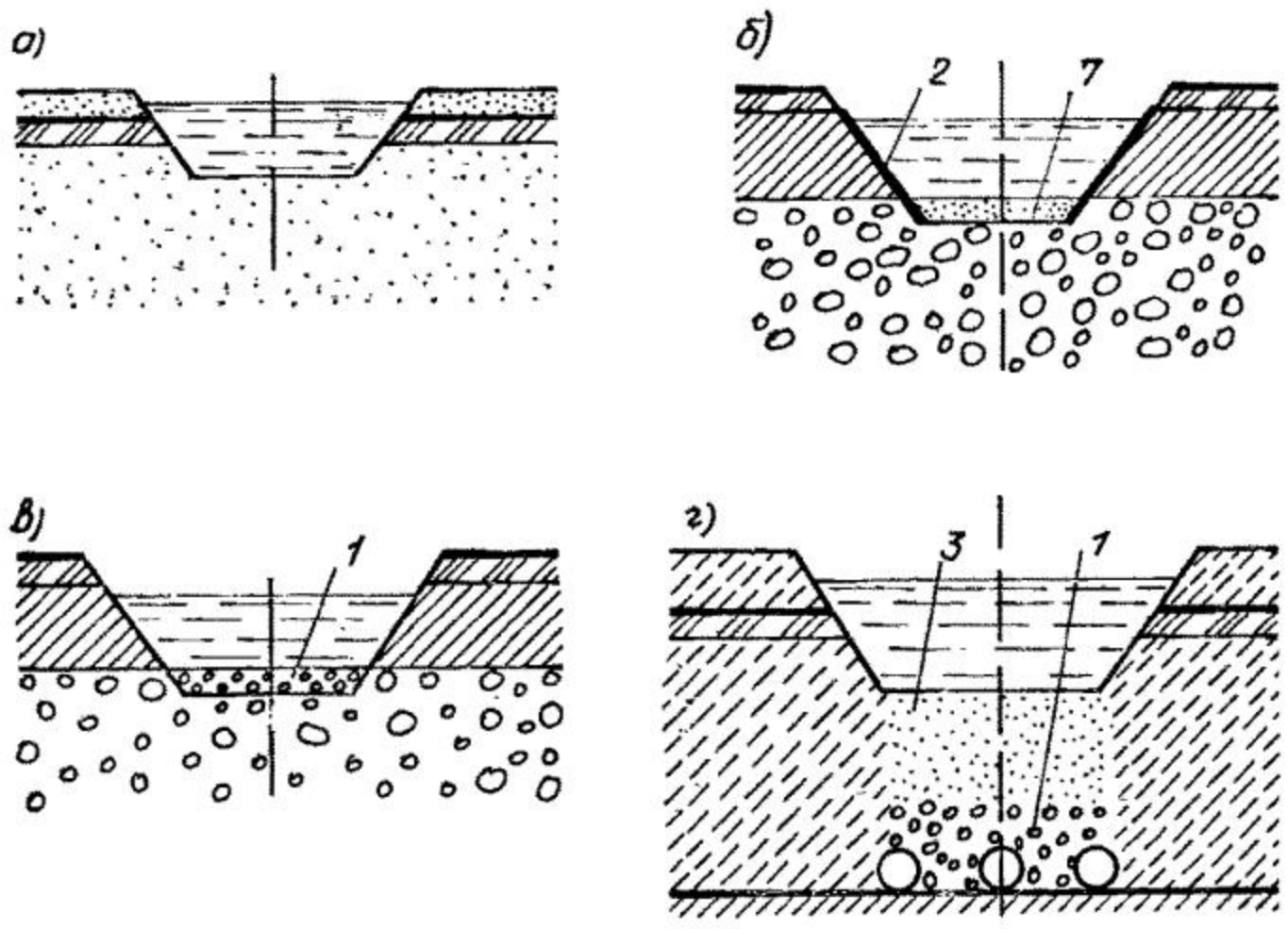


Рис. 13.5. Схемы инфильтрационных бассейнов

а — облегченного типа на песчаном основании; *б* — капитального типа с песчаной загрузкой и креплением откосов; *в* — с гравийной загрузкой; *г* — с дренажем под днищем бассейна (с обсыпкой гравием и песком): *1* — гравий; *2* — крепление; *3* — песок

скорости инфильтрации могут достигать значений 20—30 м/сут и выше.

Производительность бассейнов можно определять по аналогии с действующими установками искусственного пополнения и расчетами. Основная задача расчета инфильтрационных сооружений — определение скорости инфильтрации или фильтрационного расхода, который будет поступать в водоносный пласт в различные периоды времени. В общем случае расчет бассейнов ведут с учетом режима их эксплуатации в период наполнения, поддержания постоянного уровня, опорожнения и чистки.

Однако производительность бассейнов можно оценить и при упрощенном графике их эксплуатации, соответствующем режиму поддержания постоянного максимального возможного уровня H и постоянного расхода Q.

При $H_м$=const фильтрационный расход определяют по формуле

$$Q=\sqrt{\frac{AH_м}{2M(t-t_0)}}, \qquad (13.1)$$

где $t_0=AH_м/2MQ$; M — содержание взвешенных частиц в воде, подаваемой в бассейн (мутность; $A=k_л\gamma_{ск}$ ($k_п$ — коэффициент фильтрации осадка-пленки на дне бассейна, $\gamma_{ск}$ — объемная масса скелета пленки).

При проницаемых откосах к расходу, определяемому по формуле (13.1), добавляется расход через откосы

$$Q^0 = 0{,}67Q. \qquad (13.2)$$

В формуле (13.1) t_0 — некоторое начальное время, соответствующее задаваемому начальному расходу Q^* (обычно принимается от 5 до 10 м³/сут).

При $Q = \text{const}$ производительность бассейна с непроницаемыми откосами находят по формуле

$$Q^* = \tilde{Q}_0^* = \sqrt{\frac{AH_м}{MT^*}}, \qquad (13.3)$$

а с проницаемыми откосами

$$Q^* = Q_0^* = L\sqrt{\frac{[B^2 + 3B\sqrt{1+m^2}H_м + 2(1+m^2)H_м]\,AH_м}{MT^*}}. \qquad (13.4)$$

Величины Q и Q_0^* по формулам (13.1) и (13.3) представляют собой расходы водоподачи в бассейн, которые нужно поддерживать постоянными для того, чтобы к концу периода T^* глубина воды в бассейне составила $H_м$. В формулах (13.3) и (13.4) m — заложение откосов, B и L — соответственно ширина и длина бассейна по дну. Расчетное значение мутности M устанавливают по данным гидрологических ежегодников как среднее за период, соответствующий фильтроциклу бассейнов.

Параметр A можно определять путем исследований на опытном бассейне, инфильтрометре или фильтрационном приборе, используя соответствующие расчетные зависимости, непосредственным определением величин $k_п$ и $\gamma_{ск}$ при обследовании бассейна после его опорожнения или в процессе эксплуатации. В первом приближении $k_п$ и $\gamma_{ск}$, а значит, и величину A можно вычислить по данным о содержании глинистых и мелкопылеватых фракций P (рис. 13.6). График, приведенный на этом рисунке, составлен на основе экспериментальных исследований, проведенных в полевых условиях на ряде водозаборов подземных вод с искусственным подпитыванием.

Производительность инфильтрационных сооружений открытого типа можно восстанавливать с их предварительным опорожнением или без опорожнения. В первом случае проводят вспашку, боронование, рыхление и снятие заиленного слоя вручную или механизмами. При ручной чистке снимают наиболее загрязненный слой песка толщиной 1,5—3 см вместе с пленкой.

Регенерация без опорожнения позволяет непрерывно эксплуатировать инфильтрационные сооружения. Для этой цели пропускают повышенные расходы воды, используют земснаряды различных типов, установки с высоконапорными струями на мостовом кране. Для борьбы с заилением инфильтрационных сооружений открытого типа можно использовать и гидробиологические методы: разведение влаголюбивых растений и рыбы.

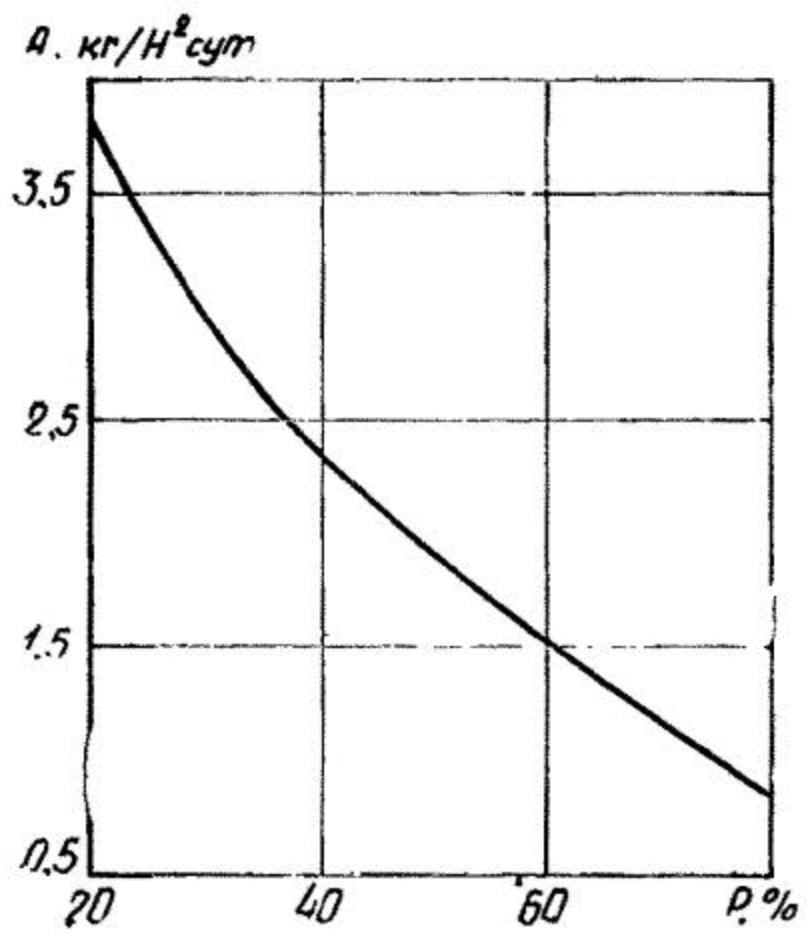


Рис. 13.6. Зависимость обобщенного параметра $A=k\gamma_{ск}$ от процентного (по массе) содержания в воде, подаваемой на инфильтрацию, мелкопылеватых и глинистых фракций

Установки искусственного пополнения с использованием открытых инфильтрационных сооружений успешно применяют в СССР (в Латвии на водозаборе «Балтезерс», в Литве на водозаборе «Эйгуляй», в Черновцах, на Чернеевском водозаборе, в Ивано-Франковске, в Калуге, Новокузнецке и ряде других городов и районов).

13.3. Закрытые инфильтрационные сооружения

Инфильтрационные сооружения закрытого типа (II тип ИВПВ) рекомендуется применять в том случае, когда на поверхности земли залегают относительно слабопроницаемые породы или при слоистом строении зоны аэрации. Эти сооружения преимущественно распространены в районах, где устройство и эксплуатация инфильтрационных бассейнов и других открытых сооружений крайне затруднены (например, в районах, где наблюдаются песчаные и пыльные бури и трудно гарантировать требуемое качество воды в открытых сооружениях или когда происходит их промерзание в зимнее время).

В зависимости от характера размещения в водоносном пласте закрытые инфильтрационные сооружения подразделяются на горизонтальные и вертикальные. Горизонтальные закрытые инфильтрационные сооружения, такие, как трубчатые дрены, галереи и штольни, не нашли широкого применения в практике восполнения запасов подземных вод. Это в первую очередь объясняется отсутствием эффективных методов восстановления их производительности и несовершенством самих конструкций.

Наибольшее распространение получили вертикальные закрытые инфильтрационные сооружения: шурфы, шахтные колодцы и буровые скважины. Шурфы, как правило, устраивают диаметром до 4 м и при глубине уровня грунтовых вод до 5 м (рис. 13.7).

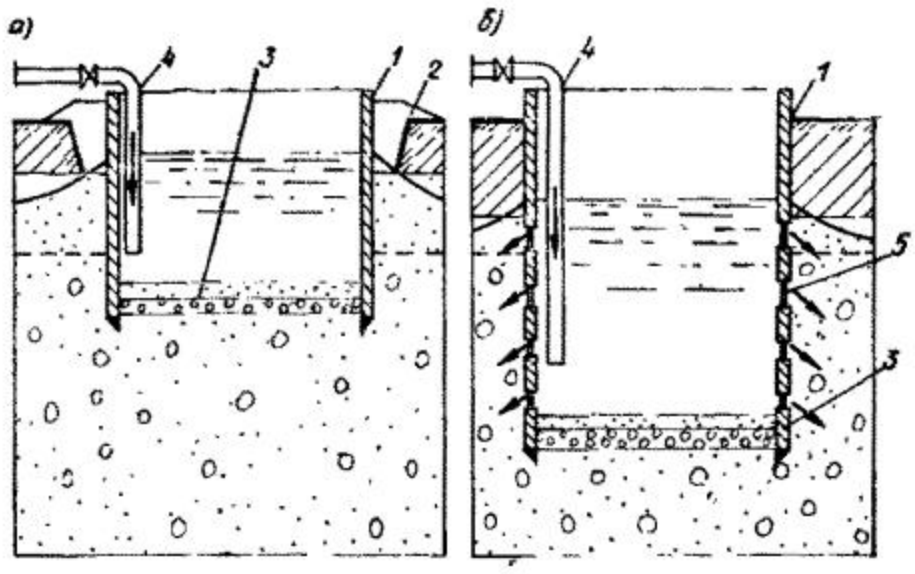


Рис. 13.7. Схемы шурфов

а — шурф, работающий дном; *б* — шурф, работающий дном и боковыми стенками: *1* — железобетонные кольца; *2* — цементация; *3* — фильтр; *4* — водоподающие трубы; *3* — водоприемные отверстия

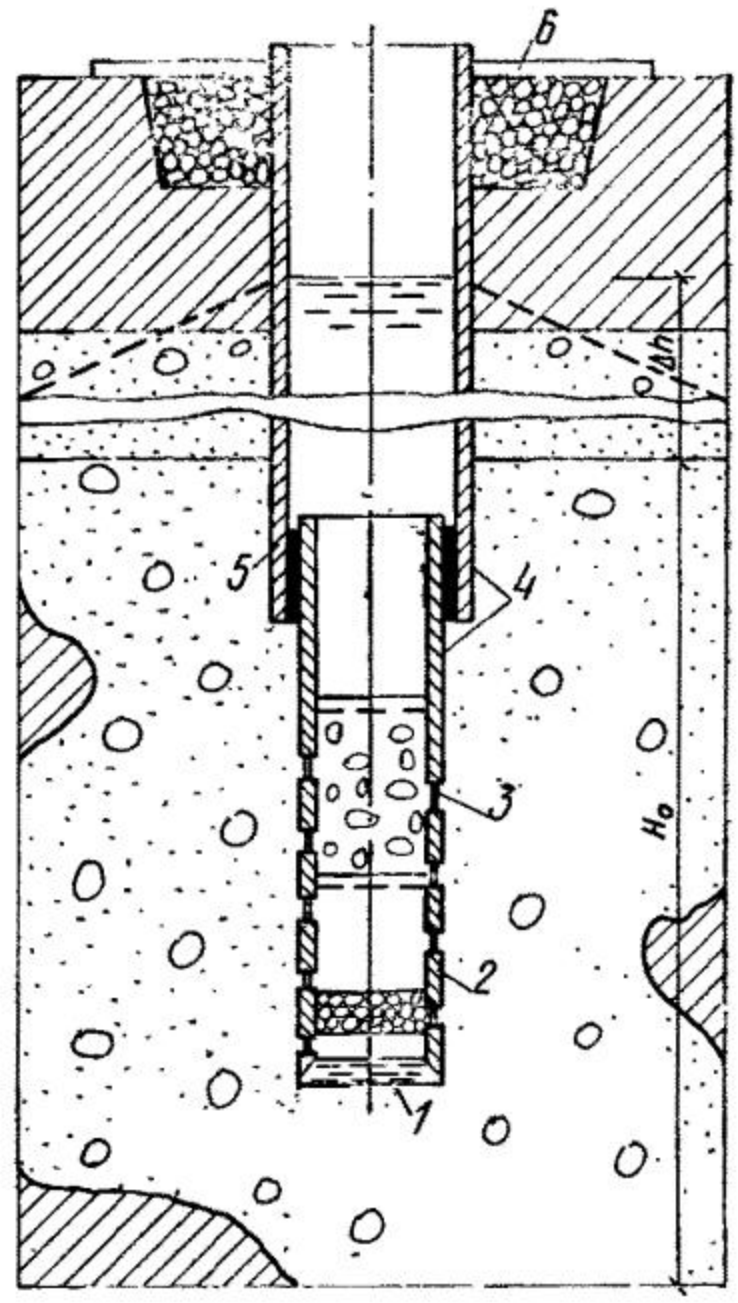


Рис. 13.8. Схема шахтного колодца

1 — металлическое кольцо опускного приспособления; *2* — фильтр; *3* — водоприемные окна; *4* — железобетонные кольца; *5* — тампон из бетона М 200; *6* — цементация

Стенки шурфов крепят бетонными кольцами, а на дне укладывают фильтрующую загрузку. Если необходимо увеличить инфильтрационный расход, можно заглубить шурф и установить в боковых стенках специальные фильтрующие элементы из пористого бетона, пористой керамики или кожуховых вставок с подобранными заполнителями.

Шахтные колодцы целесообразно устраивать, когда уровень грунтовых вод находится на глубине до 30 м. Инфильтрация из шахтных колодцев (рис. 13.8), как и из шурфов, может происходить через дно, боковые стенки или одновременно через боковые стенки и дно.

При работе колодца только дном во избежание кольматажа водовмещающих пород в зависимости от их гранулометрического состава в основании колодца устраивают одно- или двухслойный песчано-гравийный фильтр с толщиной каждого слоя не менее 15—20 см.

При работе колодца стенками в пределах вскрытой части водоносного пласта в стенках прорезают водоприемные окна и устраивают одно- или двухслойный песчано-гравийный фильтр. Толщину каждого слоя отсыпки также принимают по 15—20 см, а крупность фракций подбирают в соответствии с рекомендациями по подбору фильтров. Шурфы и шахтные колодцы целесообразнее всего сооружать в безнапорных водоносных горизонтах, сложенных крупнообломочными породами с высокой проницаемостью.

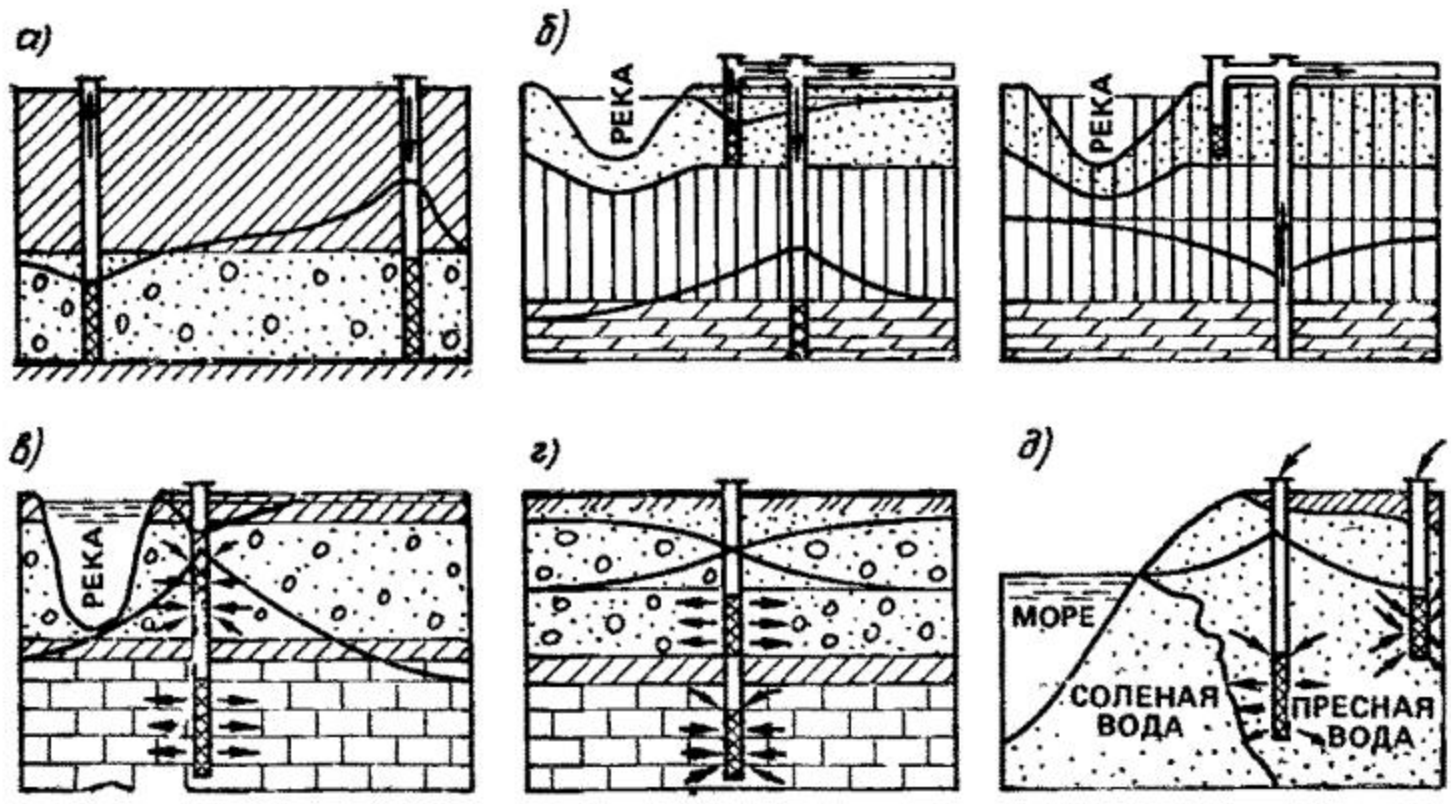


Рис. 13.9. Схемы использования поглощающих, дренажно-поглощающих и скважин двойного назначения в системах пополнения запасов подземных вод и защиты водозаборов

а — система из поглощающей и водозаборной скважины; *б* — система магазинирования с использованием грунтовых вод, отбираемых береговым водозабором, или подпитывание не насыщенного водой пласта, гидравлически не связанного с рекой; *в* — организация самотечного перетока из верхнего горизонта в нижний; *г* — то же, из нижнего горизонта в верхний; *д* — гидравлический барьер водозабора у моря

Наибольшее распространение из всех закрытых инфильтрационных сооружений получили буровые скважины, которые по назначению и условиям эксплуатации можно подразделить на следующие типы.

Первый тип — это так называемые поглощающие скважины, обеспечивающие подачу воды после ее предварительной подготовки (рис. 13.9) непосредственно в эксплуатируемый пласт. Эти скважины можно эксплуатировать как в режиме поглощения при самотечной подаче воды, так и в режиме принудительной закачки. Поглощающие скважины применяют не только для пополнения запасов подземных вод, но также для следующих целей: создания гидравлических барьеров, предотвращающих интрузию морских вод в эксплуатируемые водоносные горизонты (см. рис. 13.9); для создания линз пресных вод в пластах с солеными; в системах оборотного водоснабжения и установках кондиционирования воздуха, когда водоносный пласт используется в качестве тепловой регулирующей емкости.

Ко второму типу относятся дренажно-поглощающие скважины, предназначенные для дренирования верхнего горизонта (рис. 13.10) с подачей воды в нижний эксплуатируемый пласт или, наоборот, для перетока воды из нижнего напорного пласта в верхний безнапорный или менее напорный эксплуатируемый горизонт. При необходимости и соответствующем обосновании дренажно-поглощающие скважины могут быть оснащены водоподъемным обору-

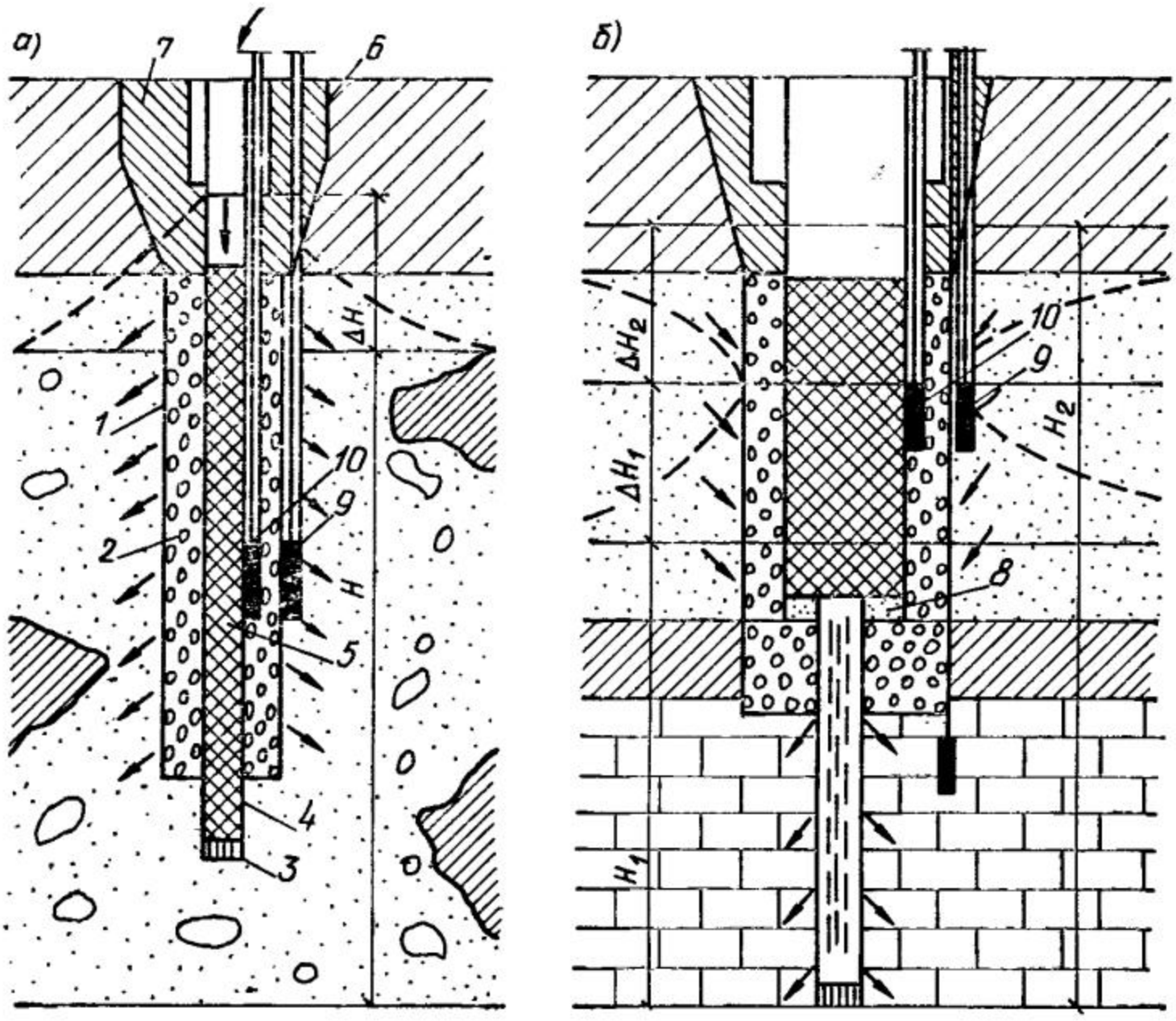


Рис. 13.10. Конструкции поглощающей и дренажно-поглощающей скважин

а — поглощающая скважина; *б* — дренажно-поглощающая скважина: *1* — фильтровый каркас; *2* — обсадка; *3* — пробка; *4* — отстойник; *5* — эксплуатационная колонна; *6* — кондуктор; *7* — затрубная цементировка; *8* — сальник; *9* — наблюдательная скважина; *10* — затрубный пьезометр

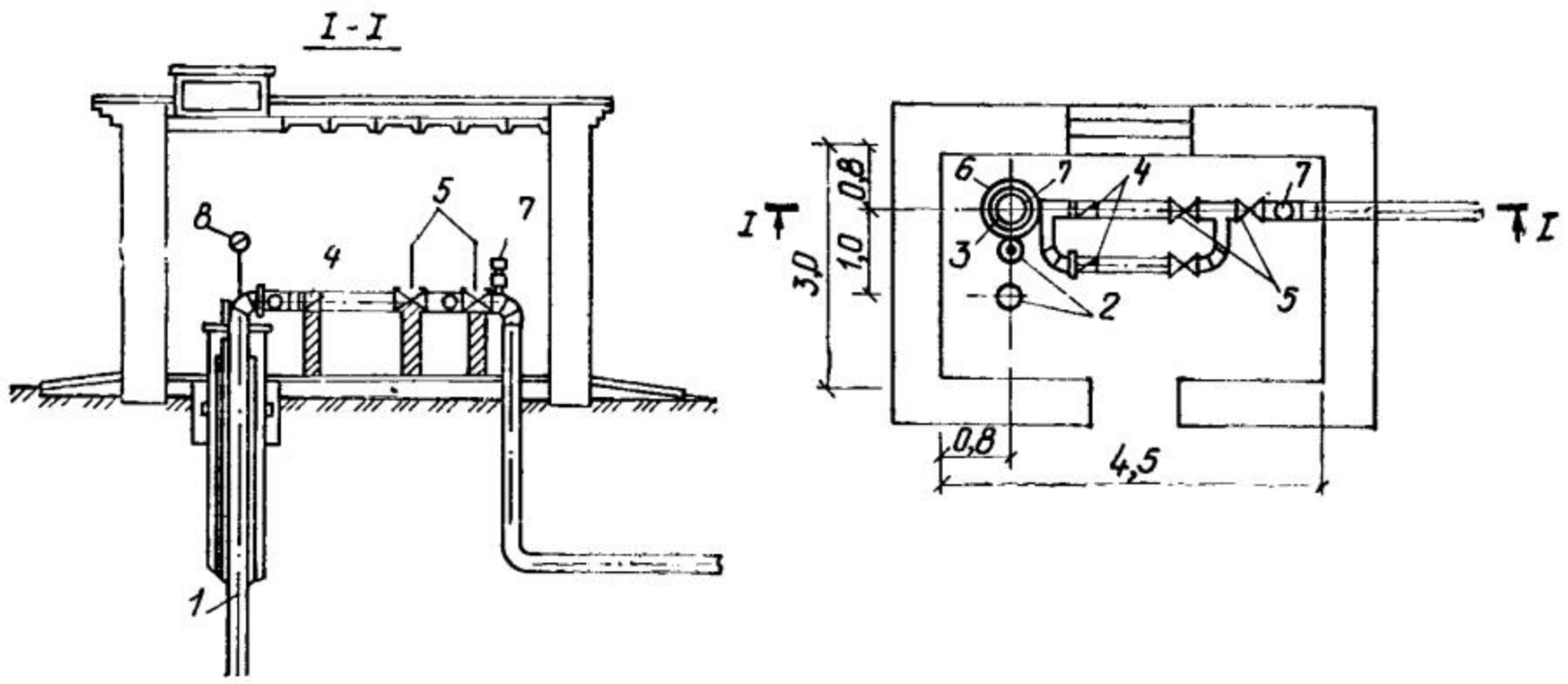


Рис. 13.11. Схема входного узла поглощающей скважины

1 — поглощающая скважина; *2* — набюдательная скважина; *3* — пьезометр; *4* — водомер; *5* — задвижка; *6* — манометр; *7* — вантуз

дованием и работать одновременно в режиме поглощения (переток) или откачки.

Помимо указанных выше типов, имеются скважины двойного назначения, работающие попеременно как поглощающие и водозаборные. Такие скважины, например, используют для обогащения подмерзлотного водоносного горизонта в летний период, чтобы использовать воду зимой, или для создания запасов в зимний период с последующим ее отбором в летнее время года.

Конструкция водоприемной части скважины двойного назначения не отличается от конструкции поглощающей скважины. Поглощающие скважины, как правило, сооружают большим диаметром с установкой фильтров из антикоррозионных материалов и устройством гравийной обсыпки. Дренажно-поглощающие скважины (см. рис. 13.10) оборудуют фильтрами на оба горизонта. Для улучшения условий дренирования или перетока гравийную обсыпку можно устраивать не только в интервале установки фильтров, но и в пределах слабопроницаемой прослойки.

Для контроля за работой скважин необходимо предусмотреть соответствующее оборудование, позволяющее измерять расход и количество воды, поступающее в пласт за время эксплуатации скважины; регулировать подачу воды в скважину и полностью отключать скважины от питающего водовода; измерять динамические уровни воды в скважине, на контуре обсыпки и вблизи скважины. Схема размещения и установки пьезометров для контроля за работой поглощающей скважины приведена на рис. 13.10, а типовая схема входного узла дана на рис. 13.11.

В скважины двойного назначения, работающие попеременно в режиме поглощения — откачки, воду можно подавать по трем схемам (рис. 13.12): в кольцевой промежуток между водоподъемной и обсадной колоннами с установкой специального патрубка на устье скважины (рис. 13.12, *а*); непосредственно через погружной насос (рис. 13.12, *б*), в котором предварительно демонтируют обратный клапан; по специально смонтированной колонне (рис. 13.12, *в*), которую опускают под уровень воды в скважине. Схема входного узла скважины двойного назначения показана на рис. 13.13.

В случае эксплуатации скважин двойного действия в режиме поглощения воду подают по подводящей линии *3* при закрытой задвижке на обводной линии. Если требуется замерить расход воды, подаваемой в скважину, закрывают задвижку *6* на подводящей линии и открывают на обводной. При переключении скважины двойного действия в режим откачки необходимо сбросить первые порции откачиваемой воды. Для этого задвижки на подводящей и напорной линиях закрывают, а на линии сброса открывают. После того как качество откачиваемой воды станет удовлетворять необходимым требованиям, скважину переключают на напорную линию.

В зависимости от конкретных условий подача воды в поглощающие скважины возможна и без соответствующей водоподготовки. Например, в районах, затопляемых в период дождей, при-

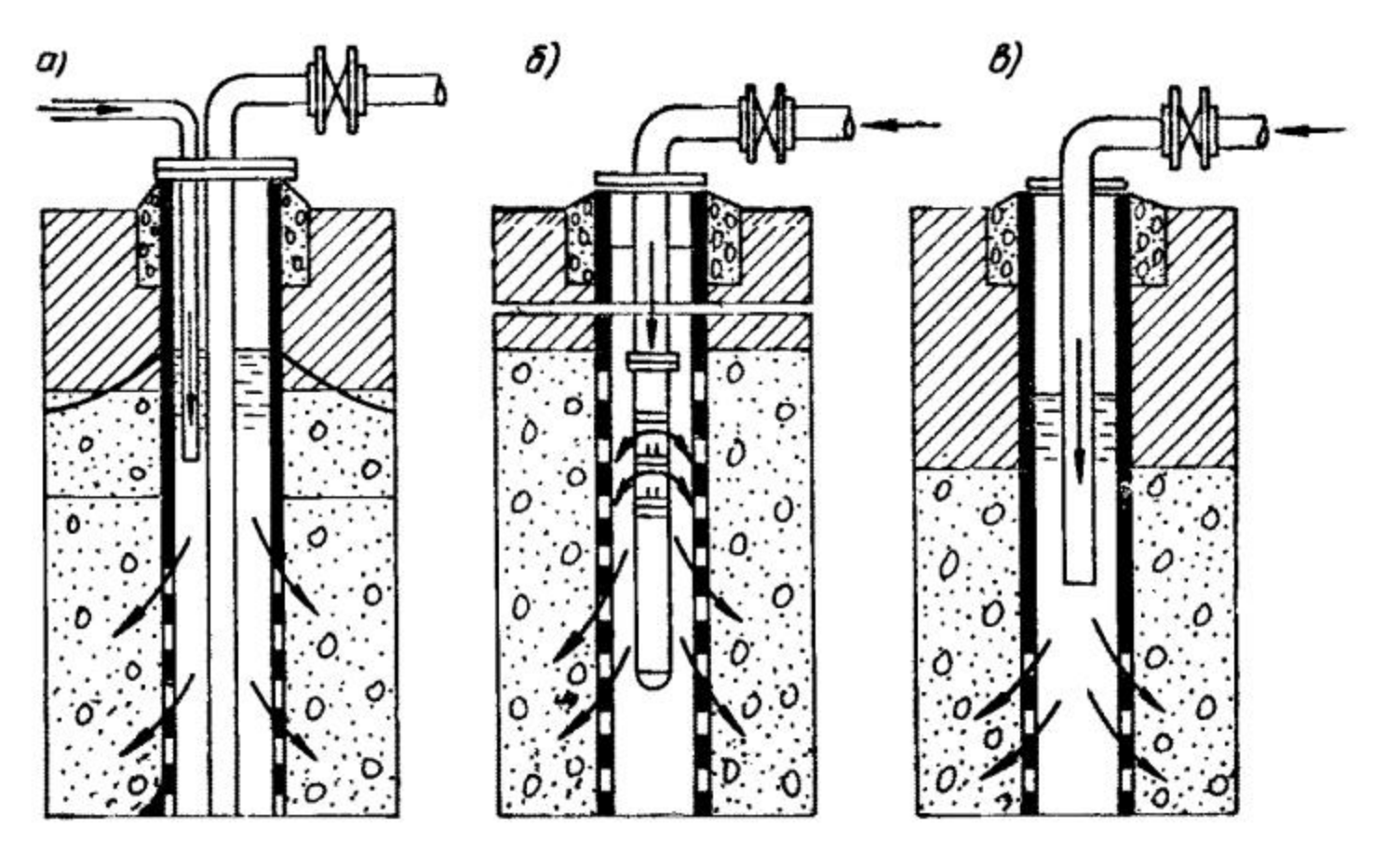


Рис. 13.12. Схемы подачи воды в скважины двойного назначения

а — в кольцевой промежуток между водоподъемной и обсадной колоннами с установкой специального патрубка на устье скважины; *б* — непосредственно через погружной насос, в котором предварительно демонтируют обратный клапан; *в* — по специально смонтированной колонне, которую опускают под уровень воды в скважине

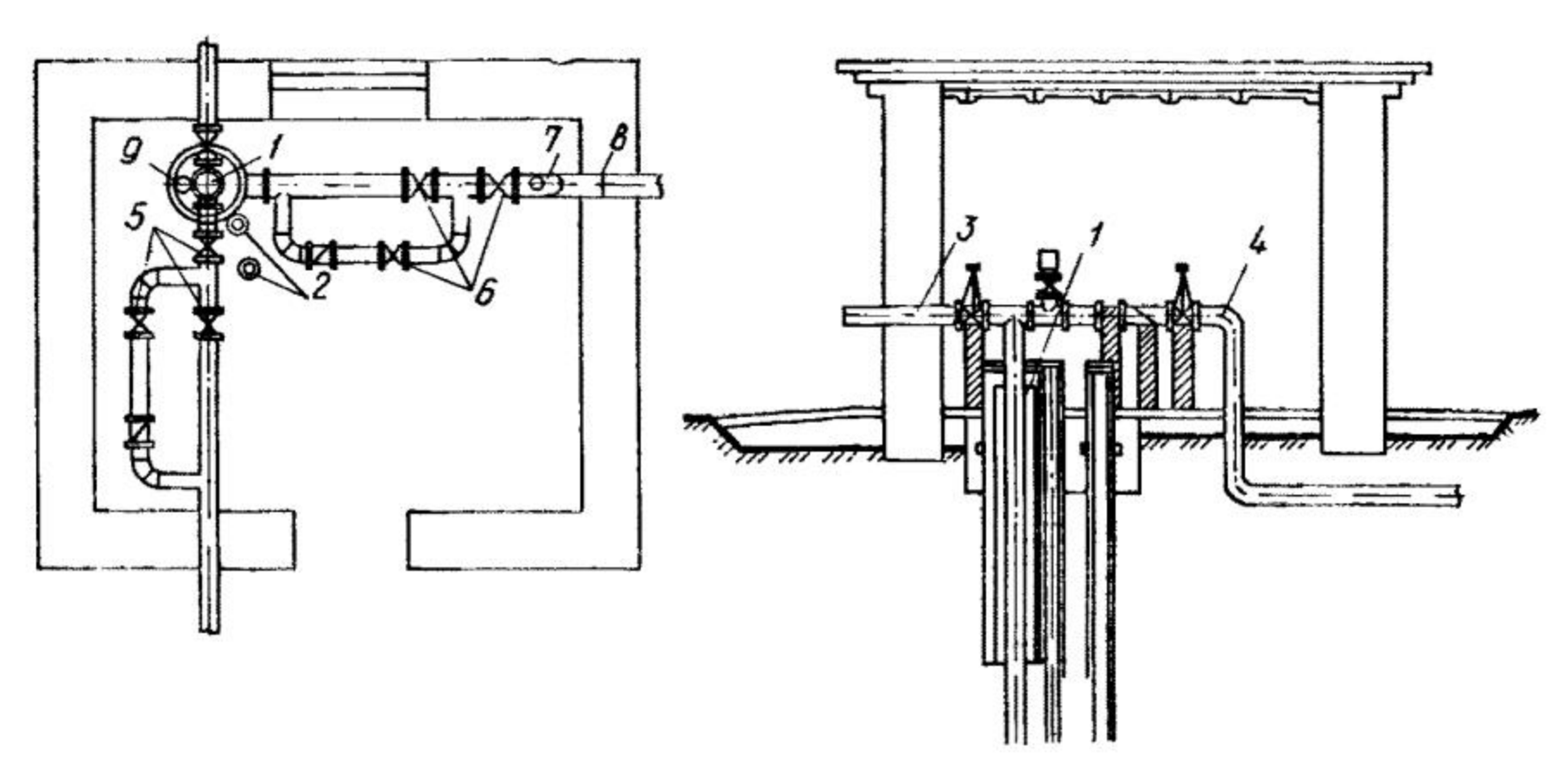


Рис. 13.13. Схема входного узла скважины двойного назначения

1 — скважина двойного назначения; *2* — наблюдательные скважины; *3* — подводящая линия; *4* — линия для отвода откачиваемой воды; *5* — сбросная линия; *6* — задвижки; *7* — вантуз; *8* — обратный клапан; *9* — затрубный пьезометр

менимы схемы, приведенные на рис. 13.14, *а* и *б*, а при расположении поглощающей скважины вблизи реки, озера или канала можно принять конструкцию оголовка скважины, приведенную на рис. 13.14, *в*.

Основная особенность расчета производительности скважин, применяемых для искусственного пополнения запасов подземных

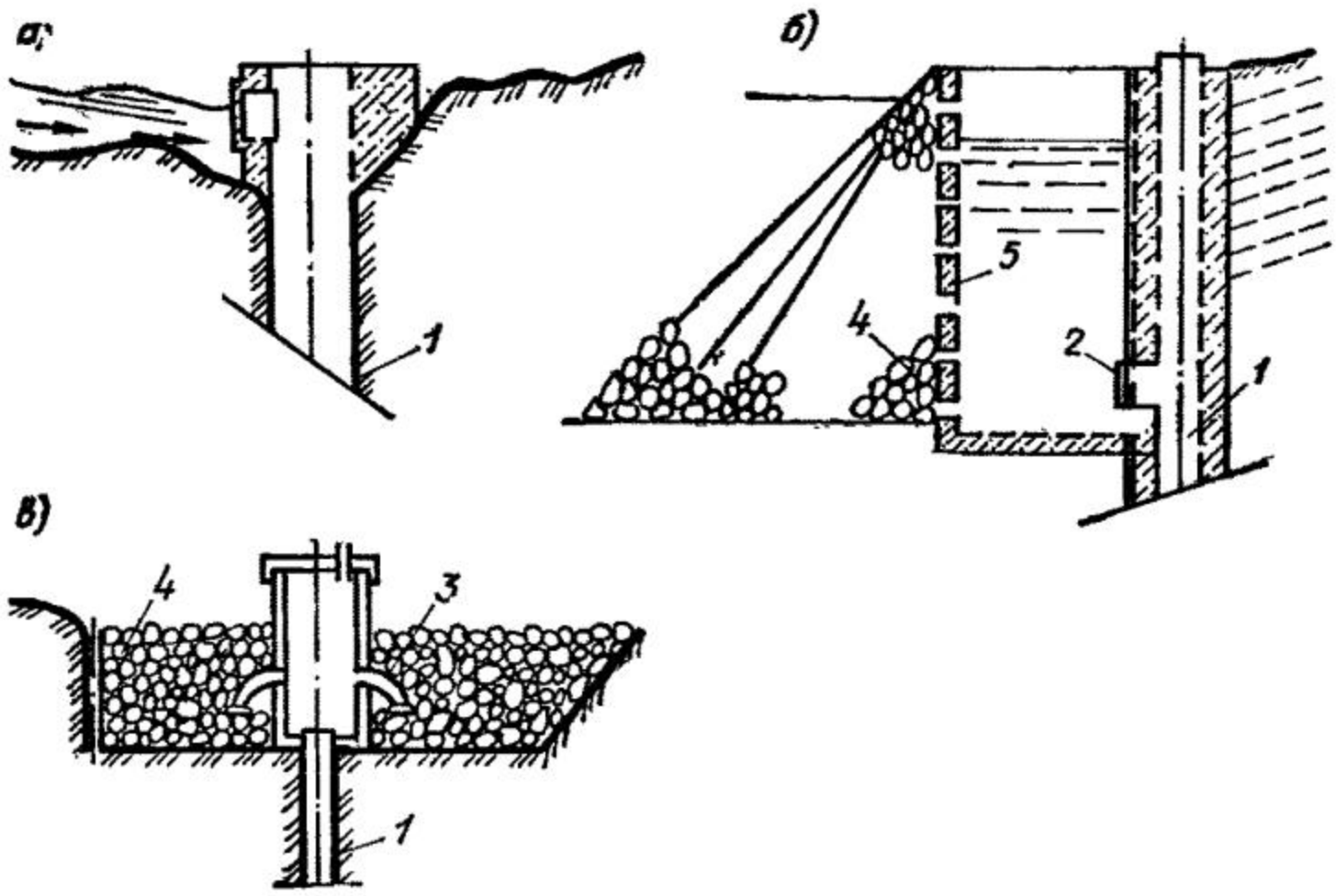


Рис. 13.14. Схема подачи воды в поглощающие скважины без водоподготовки

а, б — устройство оголовка скважины в районах, затопляемых в период дождей; *в* — конструкция оголовка скважины вблизи водоема: *1* — эксплуатационная колонна; *2* — затвор; *3* — труба d=50—75 мм; *4* — гравийный фильтр; *5* — перфорированная труба

вод, состоит в необходимости учета процессов кольматажа фильтров и прискважинных зон пласта. В зависимости от характера и физической сущности процессов, протекающих при работе скважин, различают следующие виды колматажа: 1) механический, возникающий из-за наличия в подаваемой в скважины воде взвешенных веществ органического или минерального происхождения; 2) воздушный, обусловленный накоплением в порах фильтра воздуха, проникающего вместе с закачиваемой водой или образующегося в результате десорбции из воды; 3) химический, связанный с нарушением гидродинамических и температурных условий в пласте (изменение давления и температуры) и взаимодействием закачиваемых и пластовых вод с образованием труднорастворимых химических соединений; 4) биологический, обусловленный развитием железобактерий, сульфатредуцирующих бактерий и других видов биологической деятельности.

В результате кольматажа возрастает сопротивление фильтрации воды, и при работе поглощающих скважин с постоянным расходом увеличивается напор на устье, а при закачке с постоянным напором снижается их производительность.

На начальном этапе эксплуатация поглощающих скважин, как правило, осуществляется с постоянным расходом (Q=const). Из-за кольматажа возрастает напор H на устье скважины, и к некоторому моменту времени T_1 он становится равным допустимому

значению $H_{доп}$. В частном случае, если скважина работает в режиме самопоглощения (т. е. происходит свободный налив в нее воды), величину $H_{доп}$ принимают равной отметке устья. С момента времени T_1 скважина может эксплуатироваться как в режиме $H=H_{доп}=\text{const}$, так и при $Q=\text{const}$. В последнем случае устье скважины герметизируется и вода подается насосом. На практике целесообразнее осуществлять эксплуатацию скважин в режиме $Q=\text{const}$.

Для поглощающих скважин, работающих в режиме $Q=\text{const}$, повышение напора составит

$$\Delta h = \Delta h_0 + \Delta h_{скв}, \tag{13.5}$$

где Δh_0 — повышение напора в пласте над первоначальным уровнем, обусловленное так называемым внешним сопротивлением; $\Delta h_{скв}$ — потери напора, связанные с внутренним сопротивлением в скважине и в прискважинной зоне.

Первую из указанных составляющих Δh_0 определяют по обычной формуле подземной гидравлики:

$$\Delta h_0 = \frac{Q}{2\pi km} R, \tag{13.6}$$

где k и m — коэффициент фильтрации и мощность пласта (в безнапорных пластах $m \cong 0{,}8h_c$, где h_c — первоначальная глубина воды до водоупора); R — функция внешнего гидравлического сопротивления, определяемая в зависимости от размеров и геометрической формы водоносного пласта, условий на его границах, а также размеров скважины.

Вторую составляющую $\Delta h_{скв}$ формулы (13.5) определяют следующим образом:

$$\Delta h_{скв} = \frac{Q}{2\pi km} \xi; \quad \xi = \xi_{н.с} + \xi_к, \tag{13.7}$$

где ξ — величина внутреннего сопротивления, а индексами «н.с» и «к» обозначены величины, обусловленные неполнотой вскрытия пласта и кольматажем.

По существу, в процессе эксплуатации поглощающих скважин необходимо прогнозировать изменение величины $\xi_к$. Сопротивление же $\xi_{н.с}$, как правило, во времени не изменяется.

Дополнительное сопротивление составит

$$\xi_к = 0{,}5\left(\frac{k}{k_п} - 1\right)\ln(1 + \alpha_2), \tag{13.8}$$

где $k_п$ — коэффициент фильтрации закольматированного слоя грунта

или

$$\xi_к = 0{,}5\left(\frac{k}{k_п} - 1\right)\ln\frac{Qt}{nmar_0^2}. \tag{13.9}$$

Графики возрастания дополнительного сопротивления, соответствующие рассмотренным выше закономерностям, приведены на рис. 13.15. Во всех случаях для прогноза величины $\xi_к$ исходные параметры ($k_п$, $\gamma_{ск}$, a, βN, γ) необходимо определять экспериментальным путем. Наиболее надежные данные можно получить на основе наблюдений за работой поглощающих скважин на началь-

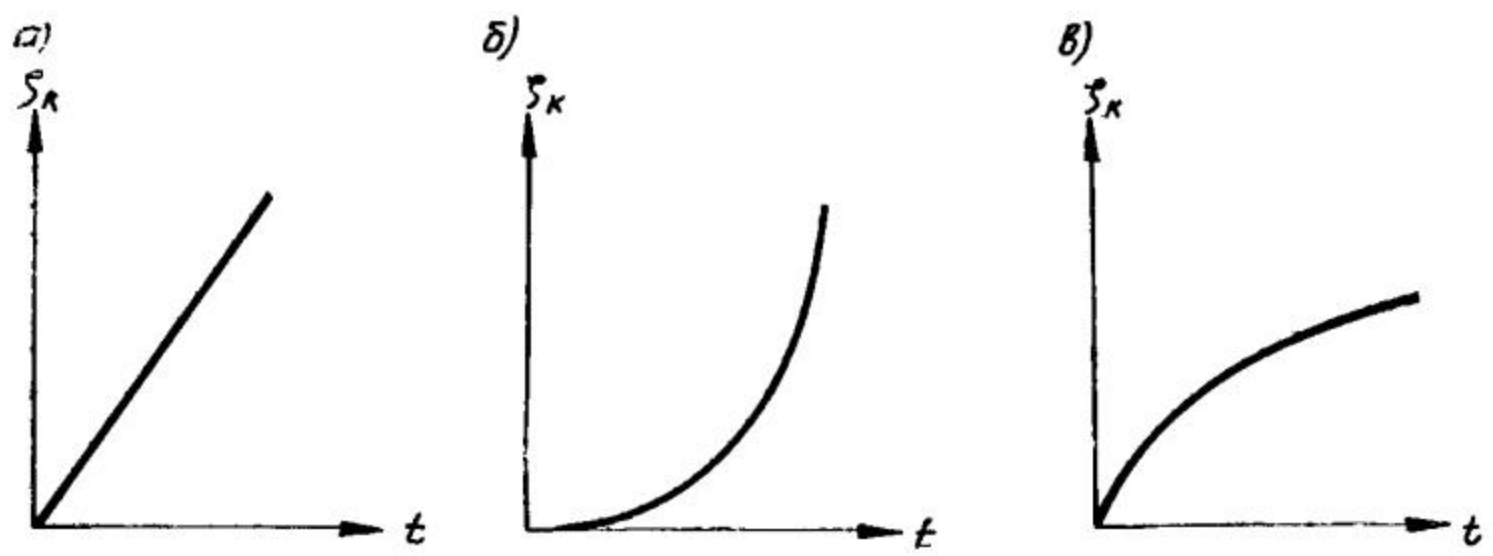


Рис. 13.15. Возрастание сопротивления $\xi_к$, обусловленного проявлением различного вида кольматажа

а — образование пленки; *б* — постепенное накопление взвеси в порах пород прискважинной зоны; *в* — накопление взвеси в порах пород прискважинной зоны в равновесных условиях

ном этапе их эксплуатации. По этим данным уточняют и корректируют намечаемые режимы эксплуатации скважин и сроки их регенерации.

ГЛАВА 14. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

14.1. Бесфильтровые скважины

При организации сельскохозяйственного водоснабжения на базе подземных вод необходимо обеспечить высокую надежность водозаборных сооружений в условиях неравномерного водоотбора, практического отсутствия резервирования скважин ввиду низкой категорийности объектов водоснабжения, варьирования дебита водозаборов в широких пределах. При этом следует учитывать, что водозаборы для сельскохозяйственного водоснабжения зачастую сооружаются в труднодоступных районах, где затруднены производство работ со строительством дополнительных водозаборов, доставка материалов и оборудования.

В этих условиях наибольшее распространение получили водозаборные скважины и шахтные колодцы. Однако именно в сельхозводоснабжении значительный прогресс был достигнут в строительстве бесфильтровых скважин и специальных типов высокодебитных водозаборов подземных вод, применяемых на объектах орошения с использованием подземного источника.

Бесфильтровые скважины используют для отбора подземных вод из рыхлых песчаных отложений, залегающих, как правило, на больших глубинах. Отличительная особенность этих скважин состоит в искусственно создаваемой водоприемной каверне, гео-

метрические размеры которой обеспечивают требуемый водоотбор без пескования. Для создания каверны необходимо, чтобы каптируемый водоносный горизонт залегал под устойчивой кровлей. Наиболее надежной в отношении сохранения устойчивости считается кровля пород, представленная известняками, доломитами, мощными слоями плотных глин. Кроме того, важным условием успешного производства работ по устройству бесфильтровой скважины является относительно слабая сцементированность зернистых пород водоносного пласта, обеспечивающая эффективный размыв каверны. Бесфильтровые скважины позволяют достигать хороших результатов при каптаже водоносных горизонтов в пылеватых и мелкозернистых песках, где подбор и устройство гравийных фильтров затруднительны.

Одно из важных достоинств этих водозаборов подземных вод — устойчивая работа во времени при сохранении неизменными гидродинамических условий водоносного пласта, так как процессы химического и биологического кольматажа здесь не наблюдаются. Вместе с тем при проектировании и строительстве бесфильтровых скважин следует иметь в виду, что их нельзя устраивать при предполагаемом прогрессирующем снижении пьезометрических напоров каптируемого водоносного пласта, при котором могут существенно изменяться показатели устойчивости пород кровли и осушается сама водоприемная каверна. Неясны перспективы развития строительства бесфильтровых скважин с точки зрения возможных локальных просадок и регионального оседания поверхности земли не только под влиянием сработки запасов подземных вод, но и выноса значительных объемов пород при размыве каверны. Следует учитывать возможность временного пескования бесфильтровых скважин в период пусков-остановок насосов, поэтому проектирование их в системе водоснабжения без промежуточной емкости нецелесообразно.

Конструкции и технология сооружения бесфильтровых скважин. Конструктивное отличие бесфильтровых скважин заключается в наличии водоприемной каверны. Форма каверны определяется характером переслаивания водоносных пород. При однородном строении водоносного пласта образуется каверна в виде воронки, но она может быть и конусообразной (рис. 14.1). При слоистом строении водоносной толщи в ходе прокачки может сформироваться несколько самостоятельных каверн. При устройстве каверн объем вынесенного песка колеблется от 3—5 до 200 м^3 и более.

Каверну разрабатывают путем откачки водопесчаной пульпы эрлифтом. В первоначальный момент формирования каверны необходимо доливать воду в скважину. Технология прокачки скважины эрлифтом при разных диаметрах скважин подробно рассмотрена в специальном руководстве [3]. Отметим лишь, что процесс размыва каверны можно ускорить, используя специальные насадки, обеспечивающие направленный гидроразмыв породы в скважине.

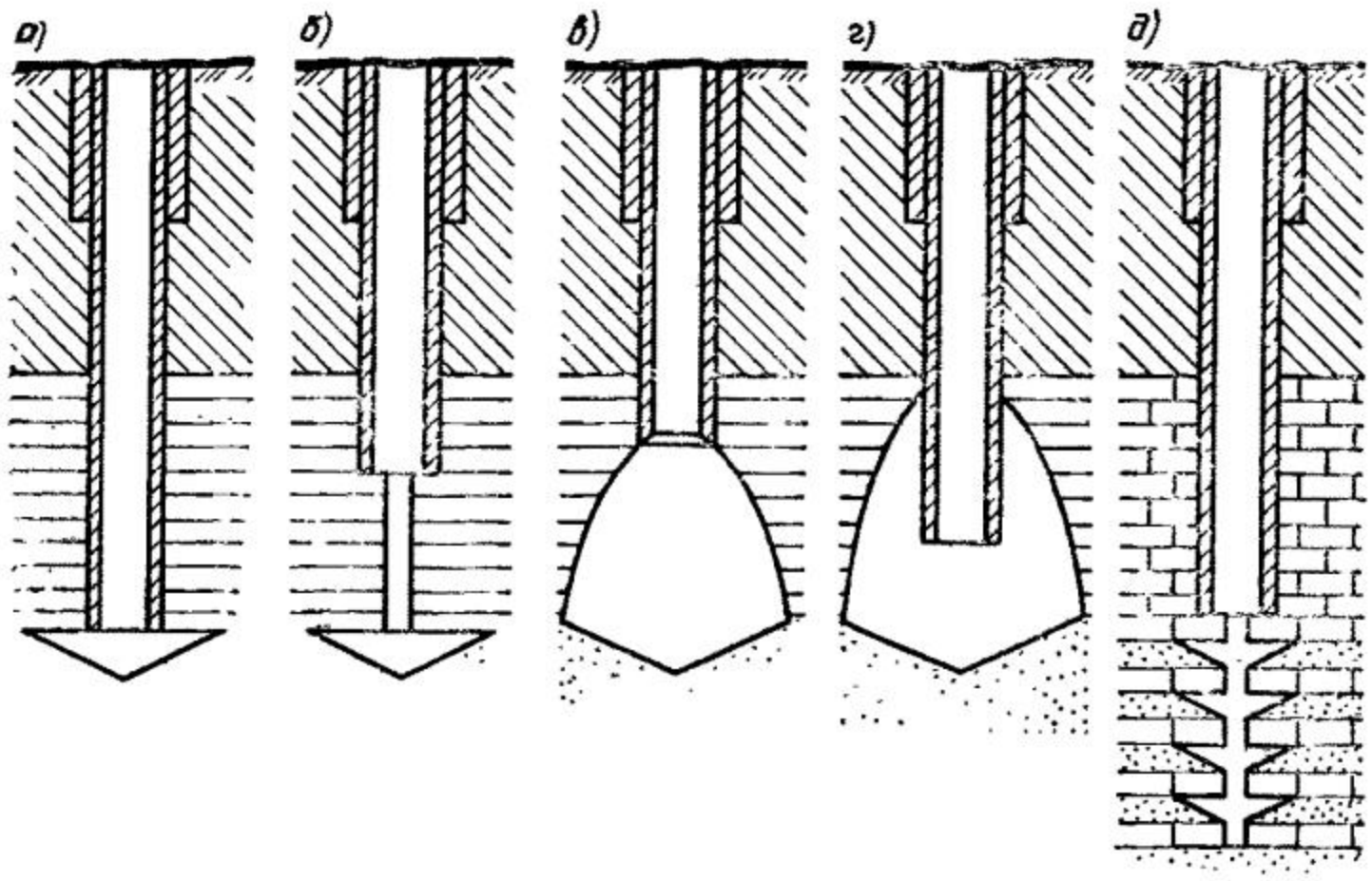


Рис. 14.1. Конструкции бесфильтровых скважин

а — скважина с водоприемной каверной в виде воронки (обсадные трубы доведены до водоносного горизонта); *б* — то же, но обсадные трубы доведены до кровли (прочные породы кровли не требуют крепления их трубами); *в* — то же, над каверной свод обрушения; *г* — обсадные трубы доведены до водоносного горизонта, над каверной свод обрушения; *д* — скважиа с удлиненной водоприемной каверной в переслаивающемся водоносном горизонте, воронки образованы в каждом рыхлом слое

В условиях возможного обрушения пород кровли и длительного пескования при прокачке каверну бесфильтровой скважины заполняют гравийным материалом. Поскольку размеры каверны обычно довольно велики, при подборе состава гравия для засыпки каверны можно задаваться коэффициентом межслойности, равным 15...20.

Неустойчивую работу бесфильтровых скважин (многократные обвалы кровли, заносы каверн породой и пескование) можно ликвидировать путем установки фильтра. Процесс переоборудования бесфильтровых скважин в фильтровые включает те же операции, что и обычная установка фильтров. Однако если причиной намечаемого переоборудования является обрушение пород кровли в пределы залегания водоносного пласта, в результате чего резко ухудшаются фильтрационные характеристики этой зоны, то рабочие части фильтра следует располагать ниже этой зоны, а интервал пород кровли перекрывать глухой надфильтровой трубой.

Основное технологическое требование при сооружении бесфильтровых скважин — создание каверн необходимых размеров, обеспечивающих устойчивый водоприток без пескования. При этом размер каверны однозначно определяется ее глубиной, радиусом $r_к$ и углом откоса песков в водонасыщенном состоянии, равновесие которого обусловливается действием сил трения и гидродинамического давления. В общем случае радиус каверны в верхней ее

части является функцией пластового давления P, понижения уровня s, плотности воды ρ, ее вязкости μ, ускорения силы тяжести g, среднего размера песчаных частиц d_{50}, плотности частиц ρ_s и мощности водоносного пласта m. При малой сжимаемости материала водоносного пласта и постоянной вязкости и плотности воды и песка зависимость между геометрическими размерами каверны бесфильтровой скважины, понижением напора в скважине и размером частиц песка можно записать в виде

$$r_к/m = \psi(s/m,\ d/m). \qquad (14.1)$$

Мишра и Анджанели провели экспериментальные и лабораторные исследования по изучению формирования каверны в грунтовом лотке в напорных условиях при постоянной мощности пласта и нагрузке на пласт, равной 2,5 т. В опытах использовались три разновидности однородных песков. В ходе опытов изучалась разработка каверны для каждого моделируемого водоносного пласта при изменении давления путем определения радиуса $r_к$ и глубины каверны $l_к$. Отмечено, что радиус каверны у кровли пласта увеличивается при понижении давления и, следовательно, расхода воды, а также с уменьшением размера частиц, слагающих водоносный пласт. Причем влияние размера частиц на формирование каверны незначительно. На основе проведенных экспериментов получена зависимость

$$r_к = 0{,}3383 s^{0{,}562} (100 d_{50})^{-0{,}1101} l_к^{0{,}548}. \qquad (14.2)$$

Для удобства расчетов размеров каверны составлена номограмма (рис. 14.2).

При гидрогеологических расчетах бесфильтровых скважин радиус каверны у кровли водоносного пласта мало влияет на их дебит. Действительно, величина водопритока в такую скважину в основном зависит от характера откоса и глубины каверны. Но в то же время для определенного района работ возможно построение корреляционных зависимостей между этим расходом, рассчитанным предлагаемым методом, и приведенным радиусом каверны, который позволяет прогнозировать производительность скважин. Кроме того, использование приведенной номограммы может оказаться полезным для обоснования технологии производства работ и подбора производительности эрлифта.

Представляет интерес и экспериментальное определение зависимости радиуса каверны от ее глубины. График, приведенный на рис. 14.3, указывает на однозначную связь геометрических размеров воронки (ее радиуса и глубины) для песков различной крупности. Глубина увеличивается по мере увеличения радиуса каверны. Зависимость $r_к$ от глубины каверны $l_к$ записывается формулой

$$r_к - 1{,}25 = 1{,}693 l_к^{1{,}04}. \qquad (14.3)$$

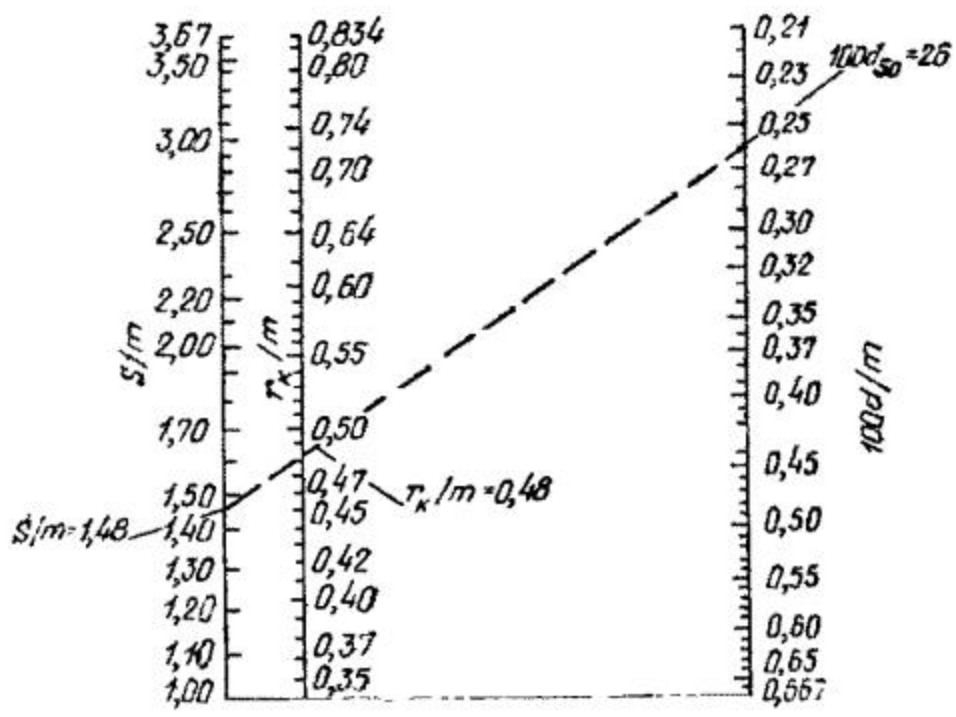


Рис. 14.2. Номограмма к определению радиуса каверны бесфильтровой скважины

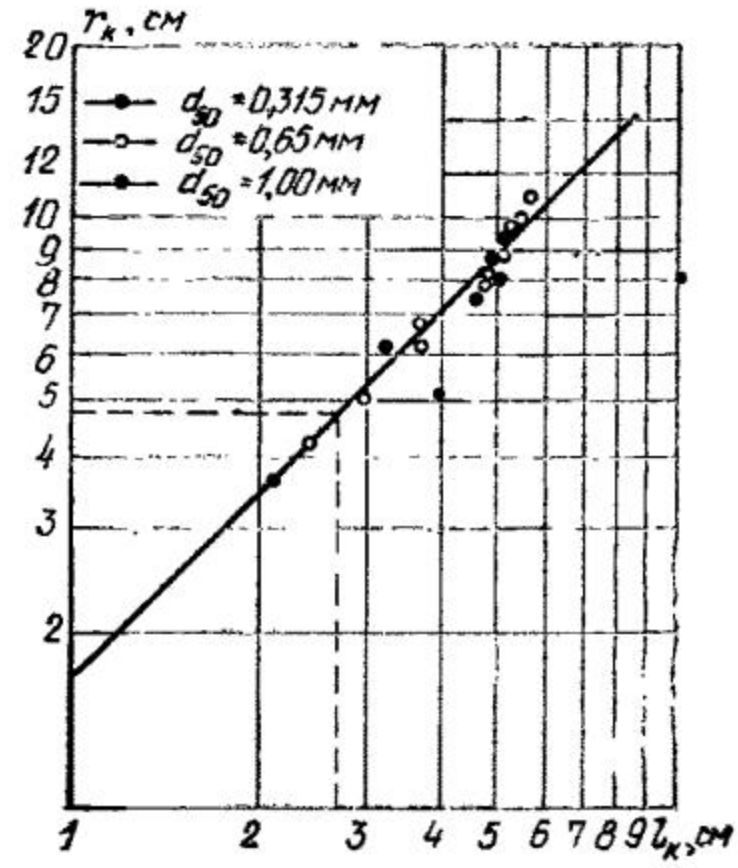


Рис. 14.3. Зависимость глубины каверны от ее радиуса

Рассмотрим пример оценки соотношения размеров каверн бесфильтровой скважины № 1 в г. Жлобине (БССР). Бесфильтровая скважина каптировала водоносный горизонт в сеноманских песках, подстилаемых плотными глинами келловейского возраста мощностью 12—17 м. Водоносные пески перекрываются мергельно-меловой толщей верхнего мела. Мергельно-меловая толща также обводнена. Мощность вскрытых песков в скважине № 1 составила 9,7 м, $d_{50}=0,25$ мм, понижение уровня в скважине в ходе откачки $s=14,35$ м. Соответствующие величины для расчета параметров каверны равны: $100d/m=0,26$, $s/m=1,48$. Величина $r_к/m$ по номограмме (см. рис. 14.2) равна 0,48 и величина радиуса каверны — 4,75 м. Глубина каверны по графику (см. рис. 14.3) при $r_к=4,75$ м равна 2,7 м, т. е. весьма близка к полученной путем ее замера ($l_к=2,8$ м). Аналогично для скважины № 38 в г. Рогачеве (БССР), каптирующей также сеноманский водоносный горизонт, по данным опытных работ Станкевича и др., имеем $s/m=1,15$ при $d_{50}=0,25$ мм, $100d/m=0,23$ и $r_к=4,5$ м.

Строго говоря, величина радиуса каверны под кровлей водоносного горизонта, в равной степени, как и ее глубина, служат характеристиками, которые дают лишь качественное представление о геометрических особенностях водоприемной части бесфильтровой скважины. В то же время они могут быть довольно надежным ориентиром при проектировании бесфильтровых разведочных и эксплуатационных скважин. Судить о радиусе водоприемной каверны можно по сопоставлению данных о его величине и приведенном радиусе бесфильтровой скважины $r_{пр}$. Ориентировочно величину требуемого понижения уровня при размыве каверны бесфильтровой скважины можно определить, используя зависимость (14.2).

Расчет водозаборов из бесфильтровых скважин. Для обоснованных расчетов бесфильтровых скважин на стадии разведки целесообразно определять не только фильтрационные параметры водоносного пласта (коэффициенты водопроводимости, фильтрации, пьезопроводности), но и оценить приведенный радиус скважины, соответствующий технологическому режиму формирования каверны. Наиболее надежно эти параметры оценивают по данным кустовых откачек. Параметры пластов при этом определяют по общепринятым методикам. Значения $r_{пр}$ определяют аналитически или графоаналитически, используя формулу Дюпюи. В последнем случае строят график в координатах $\Delta s_{0,i} - \lg r_i/r_0$ и при известном уклоне B прямой линии в этих координатах, а также начальной ординате A оценивают

$$\lg r_{пр} = A/B. \tag{14.4}$$

При наличии данных о нестационарном режиме (снижении-восстановлении) уровня в центральной (бесфильтровой) скважине и коэффициенте пьезопроводности, рассчитанном по наблюдательным скважинам, строят график

$$s_0 = \psi(\lg t) \quad \text{или} \quad s_0 = \psi\left(\lg \frac{T-t}{t}\right),$$

где s_0 — понижение уровня в скважине; t — время снижения (восстановления уровня); T — общая длительность откачки.

Оценив уклон B графика $s_0 = \psi(\lg t)$ и начальную ординату A, можно записать

$$\lg(a/r_{пр}) = A/B + 0{,}35.$$

При одиночных откачках величину $r_{пр}$ бесфильтровой скважины можно, очевидно, определить только при известных параметрах водоносного пласта. Следует иметь в виду, что $r_{пр}$, определенный в этом случае, следует подставлять при прогнозе производительности только в то соотношение, которое использовалось при оценке $r_{пр}$ (при действии групп скважин с использованием принципа сложения течений).

При установившемся режиме откачки из одиночной скважины величину приведенного радиуса определяют по формуле

$$r_{пр} = 0{,}16 Q_0/ks_0, \tag{14.5}$$

где Q_0 — расход скважины при понижении s_0; k — коэффициент фильтрации пласта.

При неустановившемся режиме фильтрации следует пользоваться соотношением

$$s = \frac{Q_0}{2\pi k r_{пр}} = \operatorname{erfc} \frac{r_{пр}}{2\sqrt{at}}. \tag{14.6}$$

Для расчета $r_{пр}$ подбором по этой зависимости необходимо иметь сведения не только о коэффициенте фильтрации пласта, но

и о его пьезопроводности. При относительно большой степени вскрытия пласта можно пользоваться при установившемся и нестационарном режиме фильтрации соответственно формулами Дюпюи и Тейса в предположении, что $r_{пр}$ в этих случаях будет комплексным параметром, величина которого определяется собственно радиусом каверны, а также степенью и характером вскрытия пласта.

При известном значении $r_{пр}$, по данным опытных работ, при $\alpha_п = l_к/m \leqslant 0{,}1$ производительность водозабора из одиночной бесфильтровой скважины определяется по формуле Форхгеймера

$$Q_0 = 2\pi k r_{пр} s_0 \tag{14.7}$$

и при неустановившемся режиме фильтрации по формуле

$$Q_0 = \frac{2\pi k r_{пр} s_0}{\operatorname{erfc} \dfrac{r_{пр}}{2\sqrt{at}}}. \tag{14.8}$$

В пластах относительно небольшой мощности при $\alpha_п \geqslant 0{,}3—0{,}4$ производительность скважины определяется по формуле Дюпюи при установившемся режиме или по формуле Тейса при нестационарном режиме. Наряду с технологическими факторами, определяющими целесообразность и возможность строительства бесфильтровых скважин, весьма важна предварительная оценка их гидравлической эффективности в сравнении со скважинами, оборудованными фильтрами. Очевидно, что бесфильтровые скважины при прочих равных условиях рационально применять в относительно маломощных водоносных горизонтах, когда влияние их гидродинамического несовершенства по степени вскрытия пласта в сопоставлении с фильтровыми скважинами невелико. Бесфильтровые скважины предпочтительнее в относительно слабопроницаемых водоносных отложениях, характеризующихся большим сцеплением частиц, в которых приходится устанавливать либо фильтры с многослойной обсыпкой, либо прибегать к установке фильтров с повышенными гидравлическими сопротивлениями.

14.2. Водозаборы из скважин с уширенным основанием

Выделяют два типа скважин с уширенным основанием: скважины с уширением в водоупоре и собственно в водонасыщенных несвязных породах. Устройство уширенного основания скважин в водоупоре было предложено М. Ф. Хасиным. Сущность этого способа заключается в устройстве «котловой» полости или сильнотрещиноватой области в контактной зоне водоупора с вышележащей водоносной породой. Котел в пластичных грунтах или трещиноватая область в скальных породах образуются взрывом заряда

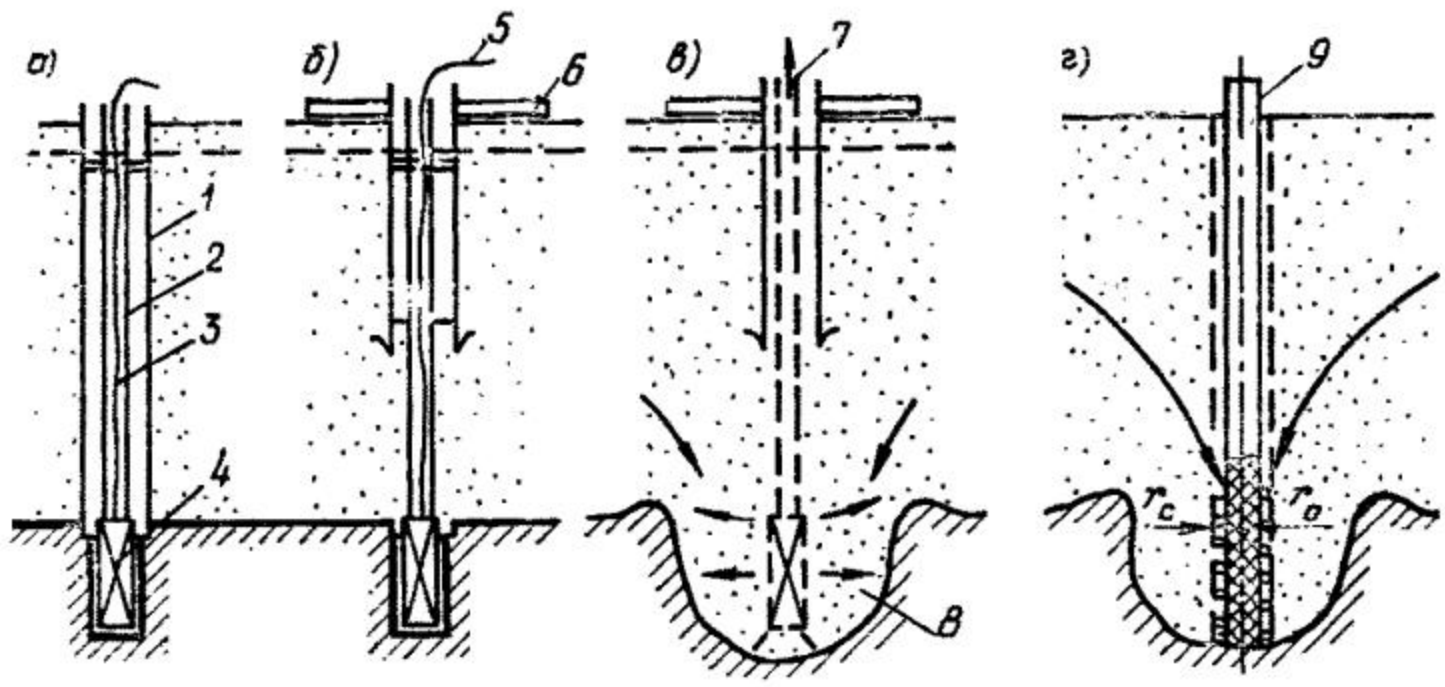


Рис. 14.4. Схема последовательности работ при устройстве скважины с уширенным основанием в водоупоре

а — бурение скважины, установка заряда и газоотводной трубы; *б* — подъем обсадной трубы; *в* — взрыв; *г* — добуривание скважины, установка фильтра: *1* — обсадная труба; *2* — газоотводная труба; *3* — детонирующий шнур; *4* — заряд; *5* — капсюль-детонатор; *6* — предохранительный хомут; *7* — выброс воды и газов; *8* — уширенное основание; *9* — фильтр

взрывчатого вещества в нижней части скважины, которая заглубляется на 1—3 м в водоупор. В пластичных породах при взрыве создается камуфлетная полость, образование которой связано в основном с уплотнением грунта.

Величина и форма полости зависят от размера и формы заряда, энергии и характера действия взрывчатого вещества, сопротивления и степени однородности пород. Диаметр котловых полостей сферической формы достигает 1,5 м и порядка 10 м при создании подземных емкостей.

В скальных горных породах результат действия взрыва проявляется в возникновении новой и увеличении существующей трещиноватости пород.

При устройстве скважин с уширенным основанием в глинистом водоупоре в г. Кремгэс (УССР) были получены уширенные основания диаметром 2,5 м при взрыве зарядов весом 50 кг и диаметром 3,4 м — при взрыве зарядов весом 100 кг. Уширение в водоупоре имеет форму цилиндра, на бортах уширения в результате частичного выпора грунта образуется валик высотой 0,4 м. Такое уширение основания скважин в производственных условиях обеспечило увеличение их дебита в среднем на 23 %. При устройстве скважин с уширенным основанием в водоупоре М. Ф. Хасин предложил следующую последовательность работ (рис. 14.4). Сначала бурится скважина с заглублением в водоупор на глубину 1—3 м, обеспечивающим размещение взрывчатого вещества. Над зарядом устанавливается труба диаметром около 150 мм для выброса газов в атмосферу после взрыва, а затем на 5—7 м поднимается обсадные трубы. После взрыва заряда скважина добуривается до низа уширения, устанавливается фильтр и проводится прокачка. Для

создания уширенного основания диаметром до 4 м в зависимости от строения пород требуется заряд весом от 10 до 300 кг.

На основе детальных лабораторных исследований показано, что расход скважин в безнапорном пласте с уширенным основанием в водоупоре можно рассчитать по формуле

$$Q_0 = \frac{\pi k s (2H - s + r_0)}{\ln R / r_c}, \qquad (14.9)$$

где r_0 — радиус уширенного основания в водоупоре; r_c — радиус ствола скважины; s — понижение уровня воды в скважине; H — мощность обводненных пород; k — коэффициент фильтрации; R — радиус влияния.

Формулой (14.9) с достаточной надежностью можно пользоваться при $H/r_0 > 4$ и $R/H < 30$.

Скважины с уширением в водоносном горизонте сооружают, используя расширители двух типов: гидромеханический с раздвигающимися под давлением нагнетания промывочной жидкости режущими лопастями, которые сжимаются при снятии давления нагнетания жидкости, или эксцентричный лопастной [1]. Вначале роторным способом бурят скважину нормальным диаметром. После достижения проектной глубины уточняют интервалы каптируемых водоносных пластов. Затем в скважину опускают на бурильной колонне расширитель. При нагнетании по буровой колонне и через расширитель глинистый раствор в скважине заменяется водой, и начинается процесс расширения: удаляются закольматированные глиной породы призабойной зоны. В процессе расширения промывка прямая. После окончания расширения и подъема бурового инструмента в скважину опускают фильтровую колонну и обсыпают ее гравием. Устойчивость стенок скважины в ходе указанных работ обеспечивается поддержанием уровня промывочной жидкости у устья скважины. По данным С. Л. Драхлиса, применение указанной технологии при вскрытии водоносных пластов и установке гравийных фильтров позволило в Краснодарском крае, по данным опробования более 100 скважин, увеличить удельный дебит до двух раз по сравнению с освоением скважин промывкой и свабированием.

При расширении всего интервала каптируемого пласта расчеты таких скважин аналогичны ранее рассмотренным приемам оценки производительности одиночных и взаимодействующих скважин. В то же время устройство уширенных скважин возможно лишь в основании. Так как в этом случае устойчивость образуемой каверны обычно обеспечивается не только противодавлением промывочной жидкости, но и глинизацией самих стенок каверны, целесообразно применять карбонатные растворы с последующей солянокислотной обработкой скважины. Технология работ в этом случае включает: бурение ствола скважины с обсадкой или под защитой бурового раствора, разбуривание уширенной полости с помощью бурового или вибрационного расширителя, монтаж филь-

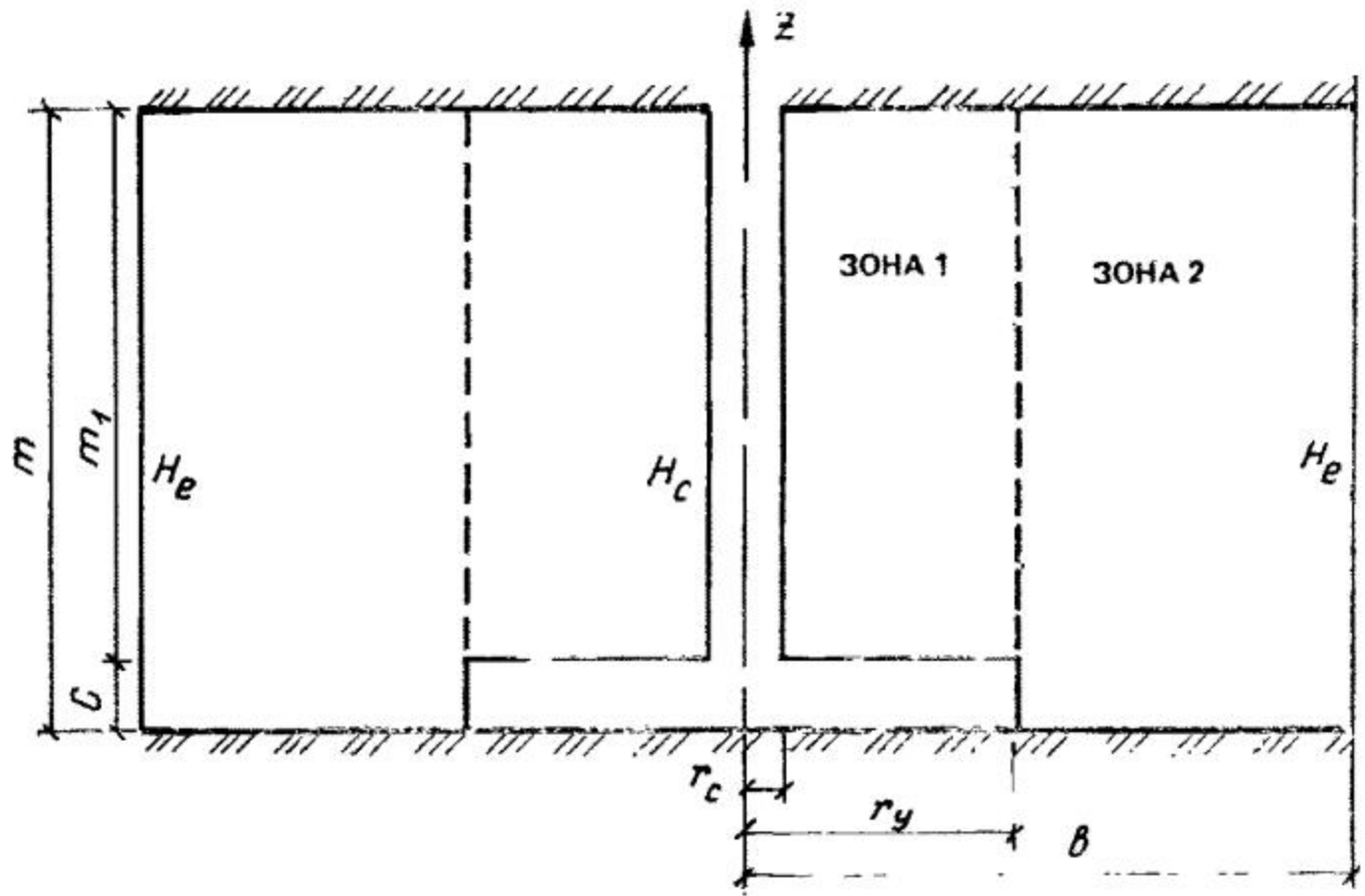


Рис. 14.5. Схема к расчету скважины с уширенным основанием

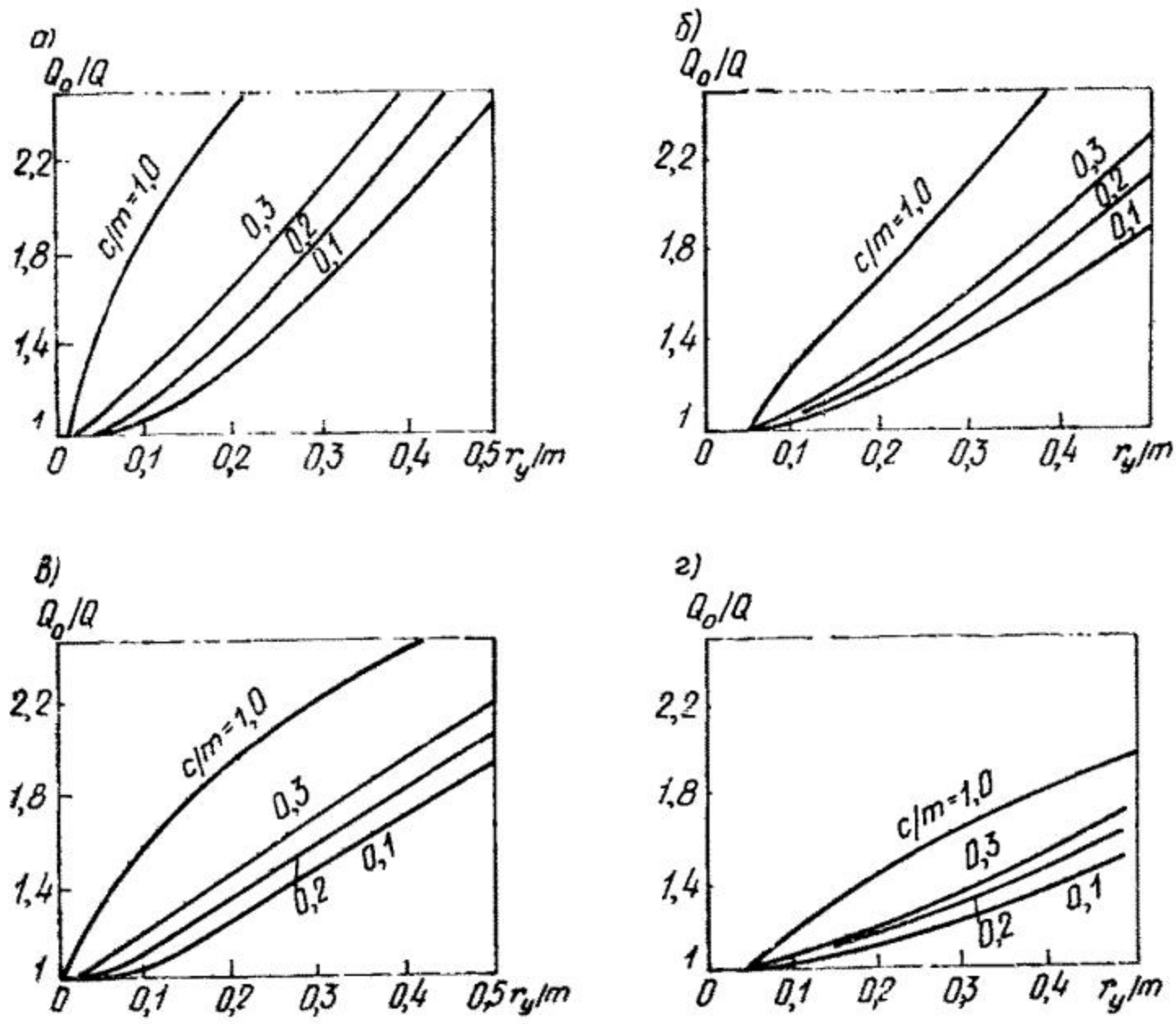


Рис. 14.6. Влияние радиального уширения на производительность скважин

а — при $b/m=1{,}5$ и $r_к/m=0{,}01$; *б* — при $b/m=1{,}5$ и $r_c/m=0{,}05$; *в* — при $b/m=5$ и $r_c/m=0{,}01$; *г* — при $b/m=5$ и $r_c/m=0{,}05$

тра с установкой радиальных секций и восстановление водопроницаемости призабойной зоны соляно-кислотной обработкой.

Приток к скважине при совместной работе ее боковой поверхности и уширенного основания следует рассчитывать (рис. 14.5)

в соответствии с точным решением, полученным в работе [1]. Скважина радиусом r_c вскрывает всю мощность водоносного пласта m. В нижней части скважины сделано уширение радиусом $r_у$. Водоносный пласт предполагается однородным, а скважина эксплуатируется с постоянным расходом Q_0. В пласте понижение статического напора H_e сохраняется на расстоянии $r=b$, постоянным в течение всего периода откачки. В этом случае поток к скважине будет осесимметричным.

Задача решена с выделением двух фрагментов: первый фрагмент в зоне $r_c \leqslant r \leqslant r_у$ и $c \leqslant r \leqslant m$; второй фрагмент — в зоне $r_у \leqslant r \leqslant b$ и $0 \leqslant r \leqslant m$. Правомерность такой предпосылки изучалась путем исследования распределения потенциалов вблизи скважины с уширенным основанием. Установлено практическое отсутствие деформаций эквипотенциалей при $r/m > 1{,}5$.

Влияние уширенного основания и его геометрических размеров на производительность скважины иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 14.6, на которых показано изменение отношения Q_0/Q (здесь Q_0 — дебит скважины с уширенным основанием, Q — расход гидродинамически совершенной скважины, имеющей такой же радиус r_c по всему стволу) от $r_у/m$ для $b/m=1{,}5$ и 5 и двух значений $r_c/m=0{,}01$ и 0,05.

Очевидно, что влияние уширения оказывается максимальным при малой мощности пласта и при наличии вблизи скважин контура питания (т. е. малых значений b/m). Расчеты указывают на возможность существенного увеличения производительности скважины при уширении ее основания. Так, в случае $b/m=5$, что вполне реально, дебит скважины возрастает в 2 раза при $c/m=0{,}1$ и $r_у=0{,}5$ м. Такое уширение скважины технически осуществимо и, несомненно, является эффективным средством увеличения ее производительности.

14.3. Водозаборы из скважин, сооружаемых по способу Беннисона, и при посадке фильтров с конусом

По способу Беннисона осуществляют бурение центральной скважины, в которую устанавливают фильтр заданного диаметра. Затем в непосредственной близости от нее на расстоянии 0,5—1 м проходят 4—5 скважин, предназначенных для подачи в них гравия. Одновременно с откачкой водопесчаной смеси из центральной скважины в гравийно-питательные скважины подают гравий, который перемещается к фильтру. В результате формируется гравийный фильтр большого диаметра, обеспечивающий получение повышенных дебитов и надежную эксплуатацию водозаборов без суффозионных процессов.

При посадке фильтров с конусом до водоносного горизонта скважину закрепляют кондуктором [1]. После этого в скважину на надфильтровой колонне опускают фильтр с башмаком-конусом.

Таблица 14.1. Приведенные диаметры скважин на одном из водозаборов г. Курска

Номер скважины	Диаметр фильтра, м	Удельный дебит скважины, м³/сут на 1 м понижения уровня	Приведенный диаметр скважины, м
Способ Беннисона			
27	0,325	307,2	0,038
28	0,325	120	0,001
29	0,325	360	0,106
30	0,325	268,8	0,004
31	0,325	321,4	0,052
32	0,325	264	0,004
33	0,325	322	0,042
34	0,325	288	0,02
35	0,325	360	0,106
36	0,325	288	0,102
37	0,325	672	1,2
38	0,325	360	1,106
39	0,325	360	0,106
40	0,325	360	0,106
50	0,325	384	0,154
Роторный с глинистой промывкой			
1	0,273	108	$4 \cdot 10^{-9}$
2	0,273	108	$4 \cdot 10^{-9}$
3	0,273	122,4	$3 \cdot 10^{-8}$
Ударный			
4	0,273	168	$3 \cdot 10^{-5}$
11	0,273	108	$4 \cdot 10^{-9}$
12	0,273	117,6	$2 \cdot 10^{-8}$
Роторный с обратной промывкой чистой водой			
12б	0,273	180	$9 \cdot 10^{-5}$
18в	0,325	158,4	$2 \cdot 10^{-5}$
24б	0,325	328,8	0,032

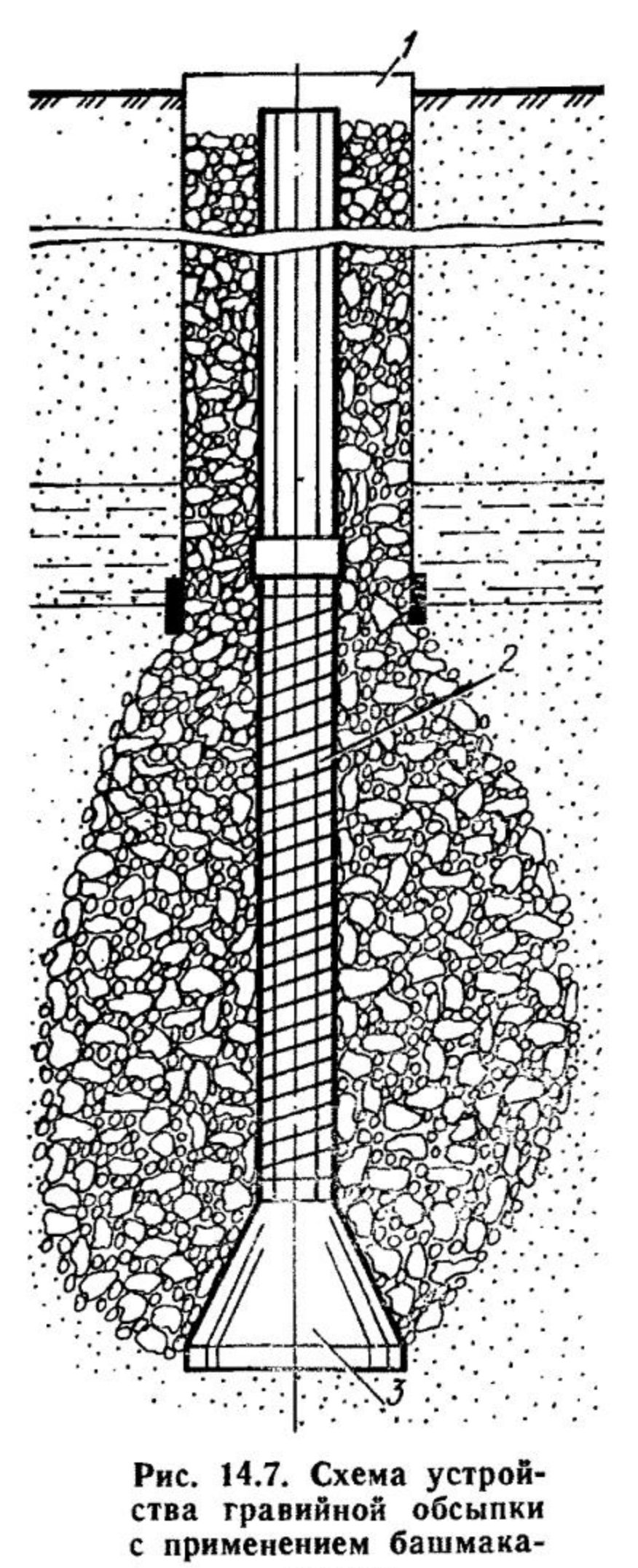


Рис. 14.7. Схема устройства гравийной обсыпки с применением башмака-конуса

1 — обсадные трубы; *2* — фильтр на колонке труб; *3* — конический башмак

Перед началом бурения пространство между фильтром и кондуктором заполняют гравием на высоту 2—3 м. В ходе бурения порода выбирается желонкой, а гравий поступает на забой (рис. 14.7). После окончания бурения забой скважины очищают от породы до низа башмака-конуса и затем засыпают гравийную подушку. Сооружение скважин указанной конструкции рекомендуется до глубины 70—80 м в однородных водоносных горизонтах без глинистых прослоев.

Рациональная в ряде гидрогеологических условий ударно-канатного бурения скважин на воду технология погружения фильтровой колонны с конусным башмаком-расширителем и одновременной закачкой гравия не всегда дает ожидаемое повышение производительности труда из-за недостаточной погружающей способности, используемой для задавливания труб полиспастной системы, громоздкость которой создает дополнительные трудности при работе с колонной. Посадку фильтра с конусным башмаком-расширителем при устройстве скважин глубиной до 60 м с гравийно-проволочными фильтрами осуществляют с помощью вибратора ВПФ-I с приходным отверстием, разработанного ВНИИГС. Вибратор ВПФ-I обеспечивает работу породоразрушающего инструмента или желонки с одновременным вибрационным погружением обсадной или фильтровой колонны и исключает возможность прихвата фильтровых колонн при их установке с одновременной засыпкой гравия. Вибрационное действие позволяет улучшить условия формирования гравийного фильтра, исключить его зависание и расширение контура укладки.

При сооружении скважин указанными способами толщину гравийного фильтра, а следовательно, диаметр каверны, заполненной гравием, оценить трудно. Поэтому такие водозаборы можно рассчитывать на основе постановки опытов в данных гидрогеологических условиях и при проектируемом способе проходки. Можно лишь отметить, что производительность этих скважин и их приведенный диаметр будут не меньше, чем при традиционных способах проходки роторным способом с промывкой глинистым раствором, с обратной промывкой чистой водой и ударным способом. Обоснованием этого положения могут служить результаты исследований, проведенных институтом ВОДГЕО на одном из водозаборов г. Курска. На водозаборе эксплуатируются скважины, пробуренные различными способами и оборудованные проволочными фильтрами на трубчатом перфорированном каркасе. Скважины каптируют аллювиально-сеноман-альбские водоносные пески в долине р. Сейм. Величина водопроводимости горизонта в среднем составляет 380 м²/сут.

При устройстве скважин по способу Беннисона величина приведенного диаметра колеблется в значительных пределах: 0,001—1,2 м при фактическом диаметре фильтра 0,325 м и расстоянии от центральной до гравийно-питательных скважин, равном 0,8—1,5 м (табл. 14.1). Такой разброс значений приведенного диаметра объясняется осуществлением бурения с установкой в центральной скважине не только фильтра-каркаса, но и производства в нем обсыпки. При этом, возможно, отсутствует непосредственный контакт гравия в центральной и гравийно-питательных скважинах, что, в свою очередь, вызывает неэффективную работу гравийного фильтра в целом. С указанным способом устройства фильтров конкурирует лишь способ роторного бурения скважин большого диаметра с обратной промывкой чистой водой. При расчетах сква-

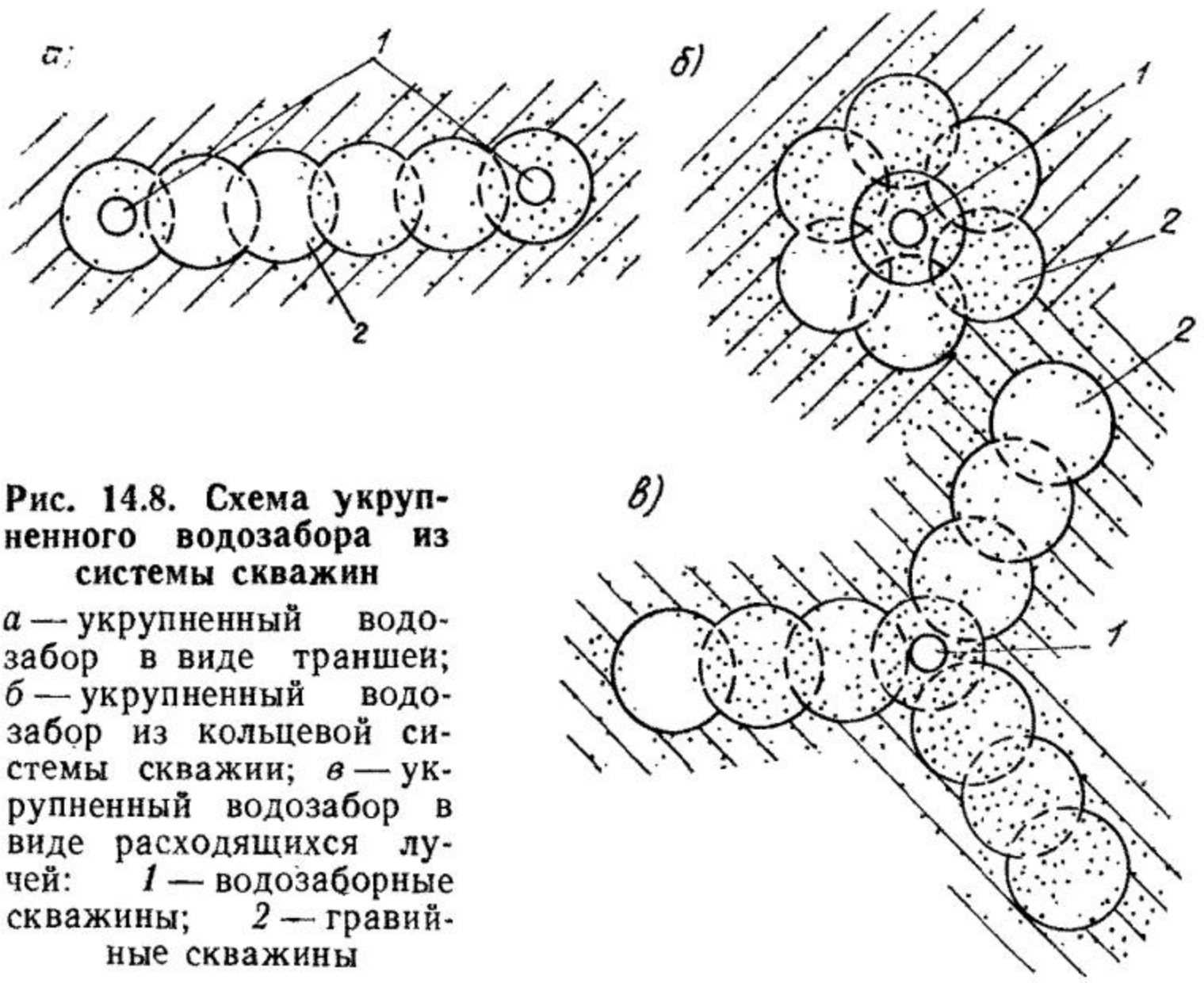


Рис. 14.8. Схема укрупненного водозабора из системы скважин

а — укрупненный водозабор в виде траншей; *б* — укрупненный водозабор из кольцевой системы скважин; *в* — укрупненный водозабор в виде расходящихся лучей: *1* — водозаборные скважины; *2* — гравийные скважины

жин рассматриваемого типа обобщенное сопротивление можно принимать равным нулю, т. е. приведенный диаметр фильтра — по фактическому значению.

14.4. Укрупненные водозаборы из систем совмещенных скважин

При необходимости получения больших количеств воды в ограниченной по размеру зоне, а также при слоистом строении водоносной толщи, когда строительство водозаборов по способу Беннисона невозможно, целесообразно устройство укрупненных водозаборов из систем скважин [1]. Отличительная особенность таких укрупненных водозаборов состоит в бурении скважин большого диаметра, наружные контуры которых пересекаются, а внутренняя полость заполняется гравием. Бурение скважин выполняют ударным способом в виде ряда траншей (рис. 14.8, *а*), кольцевой системы (рис. 14.8, *б*) или в виде расходящихся лучей (рис. 14.8, *в*).

В первом случае водоотбор осуществляется из крайних скважин, в которых устанавливаются каркасы фильтров, во втором и третьем случаях — из центральных скважин. Рассматриваемые укрупненные водозаборы совмещают достоинства скважин, колодцев и горизонтальных лучевых водозаборов. В отличие от скважин, устраиваемых по способу Беннисона, в них обеспечивается надежная связь всего гравийного массива и создается значительная водоприемная поверхность при меньших затратах.

14.5. Двухколонные конструкции скважин

Особенности притока воды в фильтр водозаборной скважины, связанные с неравномерностью нагрузки его водоприемной поверхности по высоте, предопределили необходимость такого конструктивного их выполнения, которое в полной мере обеспечивало бы каптаж водоносного пласта по всей мощности. В общем случае более равномерного притока в скважину можно добиться при чередовании в стволе участков фильтров с глухими трубами, однако это приводит к некоторому увеличению несовершенства по степени вскрытия пласта. Вместе с тем варьирование таких параметров конструкций скважин, определяющих неравномерность их нагрузки, как длина фильтра, его диаметр, коэффициент расхода или скважность, не всегда возможно или оправдано. Так, более равномерный приток обеспечивается в фильтрах с большим входным сопротивлением. Очевидно, что проектирование и устройство фильтров такого типа нецелесообразны. Поэтому для интенсификации водоотбора в пластах большой мощности может быть вполне оправдано сооружение скважин двухколонной конструкции. Особенно эффективно сооружение таких скважин на орошаемых массивах, когда необходимо получить максимальную производительность в заданной точке водоносного пласта. Сооружение высокопроизводительных скважин позволяет существенно сократить затраты на строительство коммуникаций, подъездных путей, электросетей, уменьшить зону отчуждения сельскохозяйственных угодий и сократить эксплуатационные затраты. Анализ, проведенный Гипроводхозом, показывает, что стоимость собственно скважины и ее оборудование в 6—8 раз меньше стоимости вспомогательных мероприятий.

Двухколонные скважины в развитие теоретических и экспериментальных исследований ВНИИ ВОДГЕО были впервые построены под руководством В. П. Ткаченко на участках Каменско-Днепровского, Б. Знаменского вертикальных дренажей, в орошаемом массиве «Каменский под» и на водозаборе г. Черкассы. В двухколонной конструкции скважин в качестве первой водоподъемной колонны использовали надфильтровые трубы. Вторую водоподъемную колонну врезали в отстойник и устанавливали параллельно фильтру в контуре обсыпки. Одновременная откачка из двух водоподъемных колонн обеспечивала увеличение водоотбора и способствовала включению в работу нижней части фильтра, что особенно важно при фильтрационной неоднородности пород в разрезе с залеганием в подошве водоносного пласта высокопроницаемых отложений.

В качестве примера оценки эффективности двухколонной конструкции скважин можно привести опыт опробования скважин на орошаемом массиве «Каменский под» и водозаборе в г. Черкассы. Дренажная скважина на орошаемом массиве «Каменский под» была пробурена диаметром 1200 мм и в нее был установлен кар-

касно-стержневой фильтр с водоподъемной колонной диаметром 325 мм. Для отбора воды из нижней части в отстойник фильтра приварена вторая колонна меньшего диаметра — 220 мм. Выше фильтра диаметр второй колонны равен 325 мм. Максимальная толщина контура гравийной обсыпки составила 230 мм.

На скважине были установлены два погружных насоса ЭЦВ-10-120-60. Откачку проводили раздельно из каждой водоподъемной колонны и одновременно при трех понижениях уровня S_1, S_2 и S_3 (табл. 14.2). Как следует из опытных данных, при использовании двухколонной конструкции обеспечивается даже некоторое увеличение удельного дебита при отборе существенно большего расхода воды обоими насосами.

Таблица 14.2. Данные опробования скважины двухколонной конструкции на орошаемом массиве «Каменный под»

Данные опробования	Насос 1	Насос 2	Совместная откачка
Понижение уровня, м:			
S_1	8,86	7,4	9,1
S_2	7,55	6,1	8,65
S_3	5,4	5,6	8,1
Расход откачки, м³/ч:			
Q_1	133	105	151
Q_2	111	88	145
Q_3	80	79	138
Удельный дебит, м³/ч:			
q_1	5,4	5,11	5,97
q_2	5,27	5,29	6,02
q_3	5,23	5,08	6,13
Средний удельный дебит, м³/ч	5,33	5,15	6,05

Аналогичные опытные работы были проведены на скважинах одного из водозаборов г. Черкассы. Диаметр скважин № 1 и № 2 составлял 900 мм, а диаметр фильтровых колонн соответственно 273 и 325 мм. Дополнительная водоподъемная колонна имела так-

Таблица 14.3. Результаты опробования скважин двухколонной конструкции на водозаборе г. Черкассы

Номер скважины	Вид откачки	Расход, л/с	Понижение уровня, м	Удельный расход, л/с на 1 м понижения уровня
1	Из фильтровой колонны	8,06	0,88	9,16
	Из вспомогательной колонны	7,88	0,895	8,8
	Из двух колонн	15,97	1,72	9,28
2	Из фильтровой колонны	31,1	3,57	8,68
	Из вспомогательной колонны	23,04	2,63	8,76
	Из двух колонн	52,34	5,87	8,9

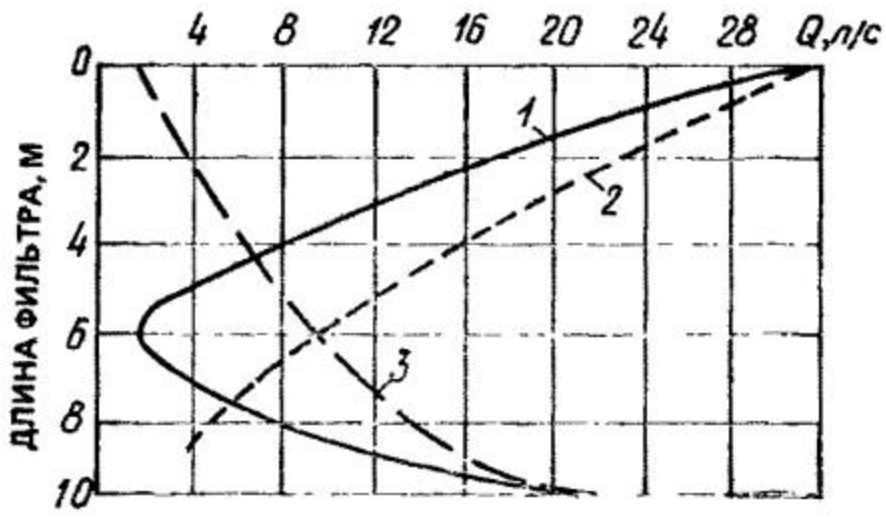


Рис. 14.9. Графики расходометрии двухколонной конструкции скважин при различном положении всаса наноса

1 — в средней части фильтра; *2* — над фильтром; *3* — в отстойнике

же соответственно диаметры 273 и 325 мм. Скважины каптировали водоносный горизонт, приуроченный к разнозернистым пескам (табл. 14.3).

Как и в предыдущем случае, при двухколонной конструкции скважин обеспечивается получение больших расходов при сохранении удельного дебита. Расходометрия скважины № 2 при раздельном водоотборе и откачке из двух колонн свидетельствует о существенной неравномерности нагрузки фильтров при откачке воды из верхней и нижней частей фильтра (рис. 14.9).

ГЛАВА 15. СВОЙСТВА И КАЧЕСТВО ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

15.1. Физические свойства воды

Рассмотрим некоторые свойства воды — физические, химические, физико-химические и микробиологические, которые наиболее существенны при использовании подземных вод для водоснабжения и орошения. Температура подземных вод, включая области многолетней мерзлоты, колеблется, как правило, от 0° С до 15—20° С. В районах многолетней мерзлоты температура подземных вод изменяется от 0 до +2...+3° С, в умеренном климате — примерно от +3 до +12° С и в южных районах СССР достигает в некоторых случаях +20° С и более.

Изменение температуры воды значительно влияет на ее фильтрационные свойства: так, при температуре воды 0° С абсолютная вязкость воды составляет 1,79 сп, а при температуре ее 20,2° С — 1 сп. Это обстоятельство нужно особенно учитывать при ИВПВ, когда, например для I типа ИВПВ, применяются инфильтрационные открытые бассейны, в которых температура поверхностных вод в умеренном климате колеблется примерно от +20° С до +1° С и, следовательно, скорость фильтрации при том же градиенте напора в зимнее время может сильно уменьшаться. Фильтрационные свойства осадка (пленки) в бассейнах ИВПВ I типа и пород под бассейнами уменьшаются обратно пропорционально

увеличению абсолютной вязкости. Это также важно для береговых инфильтрационных водозаборов.

Различают воду прозрачную, слабоопалесцирующую, опалесцирующую, слегка мутную, сильно мутную (мутность воды оценивают по ГОСТ 2874—88). Мутность определяют также по количеству взвешенных веществ. Железистые воды, получаемые из водозаборов, нередко при окислении на воздухе бывают от опалесцирующих до мутных.

В подземных водах обычно не наблюдается повышенная цветность (определяется по ГОСТ 2674—82 для питьевой воды). Запах, как правило, отсутствует, однако он может быть отмечен при наличии сульфатредуцирующих и других процессов. Электропроводность пресных вод колеблется в пределах $33 \cdot 10^{-5} \ldots 1{,}3 \cdot 10^{-3}$ Ом·м.

15.2. Химический состав подземных вод

Пресные подземные воды имеют минерализацию до 1 г/л. Для водоснабжения в засушливых районах могут использоваться подземные воды с минерализацией до 2—3 г/л. Для орошения и пастбищного водоснабжения эксплуатируются в соответствующих случаях подземные воды с минерализацией до 5—10 г/л (см. гл. 1). Минерализация воды важна не только для оценки ее качества, но как показали последние исследования, этот показатель существенно влияет на величину скорости фильтрации (рис. 15.1). Из рисунка видно, что даже небольшие изменения минерализации заметно изменяют скорость фильтрации.

Из растворенных элементов в подземных водах присутствуют простые ионы Na^+, Ca^{2+}, Cl^-, сложные ионы HCO_3^-, CO_2^{2-}, SO_4^{2-}, NO_3^- и в значительно меньшем количестве другие, кроме того, недиссоциированные молекулы и коллоиды (H_2SiO_3), а также растворенные газы (CO_2, H_2S, O_2) и др. В растворенных в воде веществах выделяют макрокомпоненты (Na^+, Ca^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, NO_3^-), которые являются преобладающими во многих типах подземных вод.

Для характеристики качества воды, особенностей его формирования, важен окислительно-восстановительный потенциал Eh, который в значительной степени зависит от газового состава воды (O_2, H_2 и др.). В связи с этим окислительно-восстановительный потенциал следует определять непосредственно в месте выхода отбора пробы горизонта. В природных подземных водах величина Eh обычно колеблется в пределах +500...—300, а pH=4—10. Показатель кислой и щелочной среды pH и окислительно-восстановительный потенциал Eh важны для прогноза качества воды. Сравнение различных окислительных состояний пресных и слабоминерализованных подземных вод при разных pH вызывает затруднения при оценке прогноза биохимических процессов. В этих случаях применяют условный показатель rH_2, реаль-

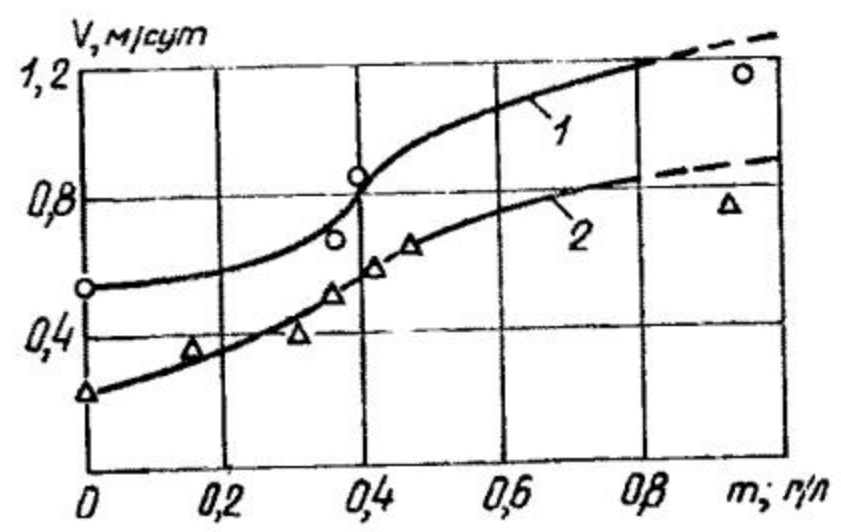


Рис. 15.1. Зависимость скорости фильтрации *V* от величины минерализации *m* фильтруемой воды (по Г. И. Панферову)

1 — для осадка № 1; *2* — для осадка № 2

ная величина которого представляет собой значение парциального давления водорода. Показатель rH_2 можно определить из уравнения, учитывающего связь pH и Eh (rH_2 — экспериментально не определяется):

$$rH_2 = Eh/0{,}029 + 2pH. \qquad (15.1)$$

Величина rH_2 не может рассматриваться как абсолютный показатель окислительно-восстановительного состояния подземных вод, но является значением парциального давления водорода, выраженного в электрических единицах.

В подземных водах, используемых для водоснабжения, встречается ряд элементов, содержание которых лимитируется ГОСТ 2874—82 (табл. 15.1).

Таблица 15.1. Концентрация нормируемых элементов в пресных водах при pH = 6,5 ... 8,5, Eh = +500 ... —300 мВ

Элементы	ПДК, мг/л	Пределы содержания элементов в подземной воде, мг/л *
Стронций	7	0,*n* — 10*n*
Бериллий	0,0002	0,000*n* — 0,0*n*
Медь	1	0,00*n* — 0,0*n*
Цинк	2	0,00*n* — 0,*n*
Свинец	0,03	0,00*n* — 0,0*n*
Железо	0,3	0,*n* — 10*n*
Молибден	0,25	0,00*n* — 0,0*n*
Мышьяк	0,05	0,00*n* — 0,0*n*
Селен	0,001	0,000*n* — 0,0*n*
Фтор	0,7—1,5	0,*n* — 10*n*

* Величина *n* изменяется от 0 до 9 ... 10.

15.3. Микробиология подземных вод и их качество

К микроорганизмам относятся не видимые невооруженным глазом многие виды одноклеточных организмов (бактерии, риккетсии, водоросли и др.), а также животных (простейшие — жгутиковые, саркодовые, споровые и инфузории). Размеры их — от долей до

десятков и сотен микрометров. Вирусы и фаги имеют размеры много меньшие — десятые и сотые доли микрометров.

Микроорганизмы характеризуются различными способами питания и дыхания, что определяется их видом и экологическими условиями, особенно окислительно- и восстановительными. По способу питания микроорганизмы разделяют в основном на автотрофные и гетеротрофные. Среди автотрофных организмов (часть водорослей и бактерий) выделяют фотоавтотрофные, использующие энергию света для усвоения углекислоты и построения органического вещества, и хеомавтотрофные, которые используют энергию окисления различных веществ. Пищей гетеротрофов являются живые и мертвые организмы. Однако некоторые автотрофы используют и органические вещества, а гетеротрофы — неорганические. Одна часть организмов живет в аэробных условиях, другая — в анаэробных.

Микроорганизмы в пресных подземных водах были обнаружены более ста лет тому назад. Внимание к этому вопросу привлечено в связи с выявлением ряда болезней при использовании питьевой воды, содержащей патогенные бактерии, например сальмонеллы, брюшного тифа и паратифа, холерного вибриона и др. В связи с этим для оценки санитарного состояния питьевой воды определяют колииндекс и количество колоний бактерий при посеве на среде МПА* (по ГОСТ 2874—82), когда прорастают в основном сапрофиты. Других микроорганизмов при этом не выявляют, хотя их количество для очень чистых вод может быть примерно в 10^4—10^5 раз больше.

С. М. Драчевым установлена связь между данными санитарных анализов и общим содержанием бактерий в воде по методу прямого счета — по А. С. Разумову (табл. 15.2). Эта связь относится к поверхностным водам, но ею можно пользоваться и для подземных вод.

Таблица 15.2. Сравнение числа микробов по прямому счету с показателями санитарного анализа

Загрязненность воды	Колититр	Микробное число	Число микробов по прямому счету
Очень чистая	10—100	$n \cdot 10^1$	10^5
Чистая	10—1	$n \cdot 10^2$	10^6
Умеренно загрязненная	1—0,05	$n \cdot 10^3$	10^6
Загрязненная	0,05—0,005	$n \cdot 10^4$	10^7
Грязная	0,005—0,001	$n \cdot 10^5$	10^7
Очень грязная	0,001	$n \cdot 10^6$	10^8

В табл. 15.3 приведены бактериологические анализы воды из скважин, эксплуатировавших артезианские водоносные горизонты в каменноугольных известняках (Московская обл.). По пробам

* Мясопептонный агар — питательная среда.

воды имеются также санитарные бактериологические анализы согласно ГОСТ 2874—82. Колииндекс почти во всех случаях <3, а количество колоний при посеве на среде МПА обычно 0 и реже 1—2 колоний/л, т. е. по ГОСТ 2874—82 вода была классифицирована как очень чистая.

Таблица 15.3. Содержание бактерий в водах из артезианских скважин в каменноугольных известняках

Объект	Количество бактерий по методам посева на питательных средах, колония/мл			Общий счет по А. С. Разумову, тыс. колоний/мл
	МПА	Клауса	ГА (голодный агар)	
Ногинск (2 скважины)	4—10	80—90	45—65	5—8
Пос. Зеленый (1 скважина)	12	100	90	10—12
Подольск (3 скважины)	8—25	21—190	18—120	63—68

В СССР вода, подаваемая потребителю для хозяйственно-питьевых целей, должна отвечать требованиям ГОСТ 2874—82. Следовательно, вода, получаемая из водоносного горизонта с искусственным восполнением, при несоответствии государственному стандарту должна проходить последующую очистку. В указанном ГОСТе приводятся предельные нормы для питьевой воды: бактериальные показатели; общие физические и химические показатели; концентрация токсических веществ и органолептические показатели.

Суммарная концентрация токсичных веществ, а также суммарное содержание сульфатов и хлоридов, если последние придают воде привкус, не должны быть более суммы долевых участий (по отношению к их предельно допустимой концентрации)

$$\bar{C}_1/C_1 + \bar{C}_2/C_2 + \ldots + \bar{C}_n/C_n < 1, \qquad (15.2)$$

где $\bar{C}_1$, $\bar{C}_2$, ... $\bar{C}_n$ — обнаруженные концентрации, мг/л; C_1, C_2, C_n — предельные концентрации по норме, мг/л.

Водородный показатель должен быть в пределах 6,5...8,5. Следует учитывать также дополнительные рекомендации о допустимых концентрациях различных веществ, установленных Минздравом СССР. Остаются в силе показатели предельно максимальных концентраций веществ, не вошедших в ГОСТ 2874—82.

Запахи и привкусы являются чаще результатом жизнедеятельности и отмирания микро- и макроорганизмов в воде; наиболее устойчивый и трудноустранимый землистый и затхлый запах вызывают актиномицеты.

В требования к качеству хозяйственно-питьевых вод не входят данные о наличии в них вредных и опасных растительных и животных одноклеточных и многоклеточных микроорганизмов, например амеб и др.

ГОСТ 2874—82 не содержит также данных по вирусам. Но предельно допустимые показатели по кишечной палочке и количеству бактерий в этом нормативном документе позволяют оценить воду как безвредную по вирусам.

15.4. Изменение химического состава и качества подземных вод при их эксплуатации

Изменение состава и качества подземных вод в естественных условиях обычно происходит медленно. При эксплуатации водозаборами подземных вод, особенно при глубоком их залегании, в течение нескольких лет может наблюдаться незначительное изменение качества подземных вод. Например, длительная эксплуатация артезианских водоносных горизонтов, приуроченных к отложениям каменноугольной и девонской систем Подмосковной котловины, показала, что состав подземных вод заметно не изменился.

Однако нередки случаи изменения состава подземных вод в процессе эксплуатации. Такое изменение иногда может быть столь выражено, что воды становятся непригодными или малопригодными для использования. Например, в подземных водах среднего сармата в одном из пунктов на юге европейской части СССР за 4 года эксплуатации сухой остаток в воде увеличился с 800—1000 до 1800—2200 мг/л; вода стала непригодной для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

В некоторых случаях наблюдается изменение состава подземных вод, но они остаются пригодными для использования. Например, на Кавказе за 25 лет эксплуатации одного из крупнейших водозаборов подземных вод Шоларского водопровода наблюдалось для различных водоносных горизонтов и скважин увеличение сухого остатка на 30—150 мг/л, увеличение общей жесткости воды на 0,2—1 мг-экв/л, а также некоторое увеличение содержания сульфатов и хлоридов.

Характер и условия изменения состава подземных вод разнообразны. В одних случаях увеличивается их общая минерализация, в других — изменяется химический состав воды. Отмечаются случаи изменения жесткости вод, наблюдается химическое и микробиологическое загрязнение.

Следует отметить, что изменение состава подземных вод непосредственно на участке каптажа обычно отстает во времени от возникновения фактора, обусловливающего это изменение. Такое отставание может быть весьма значительным. В одних случаях изменения носят постепенный характер; в других — наблюдается резкое скачкообразное колебание состава подземных вод как в одном, так и в разных каптажных сооружениях одного и того же водоносного горизонта.

При правильном проектировании устройств и эксплуатации систем ИВПВ вода обычно соответствует требованиям ГОСТ 2874—82. Однако, как правило, для профилактики сохранения

благоприятных бактериальных показателей проводят дополнительное хлорирование воды. Очень важно, что при кратковременном ухудшении качества исходной поверхностной воды водоносный горизонт (из рыхлых пород) выполняет функции барьера, предотвращая резкое ухудшение получаемой из водозаборов воды.

Влияние окислительных процессов в зоне аэрации и в грунтовых водах при эксплуатации на изменение качества воды. Рассмотрим это на примере эксплуатации Мытищинского водозабора (Московская обл.). Водоносный горизонт приурочен в основном к флювиогляциальным и древнеаллювиальным песчано-гравелистым отложениям мощностью до 15—30 м. Рассматриваемый водоносный горизонт отделяется от нижележащих подземных вод в каменноугольных известняках юрскими глинами. Перекрывается водоносный горизонт современными аллювиальными песчано-глинистыми отложениями и торфом.

Этот водоносный горизонт, расположенный в верховьях р. Яузы, на большей части своего распространения представляет собой бассейн грунтовых вод, местами имеющих напорный характер. На территории распространения водоносного горизонта имеются торфяные болота, вода которых гидравлически связана с грунтовыми водами.

Через 106 лет эксплуатации уровень в скважинах водозабора снизился по сравнению с первоначальным примерно на 13 м.

Изменение состава подземных вод, в частности, происходило в результате следующих процессов (табл. 15.4). При осушении торфяных болот становится более легким доступ кислорода воздуха в осушенную зону торфяника, в результате окисления пирита образуется серная кислота. Последняя при насыщении торфа водой связывает основания солей более слабых кислот, образуя сульфаты. Часть серной кислоты остается свободной. Затем при просачивании осадков эти сульфаты растворяются, увлекаются вниз, попадают в водоносный горизонт и увеличивают минерализацию воды. Такие процессы была обнаружены на участках водоносного горизонта, перекрытого сверху торфом.

Таблица 15.4. Изменение состава подземной воды при эксплуатации Мытищинского водозабора

Время эксплуатации	Сухой остаток, мг/л	Общая жесткость, мг-экв/л	SO_4^{2-}, мг/л	Cl^-, мг/л	Fe^{2+}, мг/л
Начало (приближенно)	145	2,23	4,8—8,4	2,5	0,31
106-й год эксплуатации	501,7	7,75	139,56	5,1	1,3

Изменение состава подземных вод на эксплуатируемом участке водносного горизонта путем притока с других участков того же горизонта. Изменение состава подземных вод при их эксплуатации наблюдалось в артезианском горизонте, приуроченном к лебедянским слоям фаменского яруса верхнего отдела девонской системы,

в районе Тулы. В долине небольшой речки над лебедянскими слоями залегают непосредственно четвертичные отложения, а по водоразделам лебедянские слои прикрыты нижнекаменноугольными глинами, известняками и песками. Лебедянские слои представлены сверху известняками, а ниже — переслаиванием известняков, доломитов, глин с прослоями гипсов.

В долине реки подземные воды в верхней части лебедянских слоев значительно опреснены, а глубже и по водоразделам минерализация и жесткость подземных вод в тех же отложениях значительно больше. Ближе к речке расположена скважина, которая вскрыла артезианские воды в верхней части лебедянских слоев. При эксплуатации скважины объем получаемой воды равен 50 м^3/ч из верхней 10—15-метровой толщи лебедянских известняков. За 106 лет эксплуатации сухой остаток увеличился с 518 мг/л до 974 мг/л, общая жесткость — с 8,6 мг-экв/л до 16,61 мг-экв/л, SO_4^{2-} — с 121,4 мг/л до 464,4 мг/л и Ca^{2+} — с 120,4 мг/л до 344,2 мг/л. По мере углубления разведочной скважины около того же участка были получены следующие данные: при глубине 47 м общая жесткость воды составила 6,46 мг-экв/л, при глубине 57 м — 11,2 мг-экв/л и при глубине 65 м — 18,68 мг-экв/л. Это ясно показывает, что имеет место подсос более минерализованных и жестких вод с больших глубин из того же водоносного горизонта.

Изменение состава подземных вод при подсасывании из других водоносных горизонтов при наличии дефектов обсадных колонн в стволе скважин. В качестве примера можно привести эксплуатацию в Крыму водоносного горизонта с водой хорошего качества, выше которого находится водоносный горизонт с загрязненными и агрессивными водами. Эти водоносные горизонты разделены глинами. Изменение состава воды в эксплуатируемом нижнем водоносном горизонте произошло вследствие проржавевших обсадных труб скважины верхнего горизонта (табл. 15.5).

Таблица 15.5. Изменение состава подземных вод вследствие неудовлетворительного технического состояния скважины

Показатель	Скважина с обсадными трубами, не имеющими дефектов	Скважина с проржавевшими обсадными трубами	Показатель	Скважина с обсадными трубами, не имеющими дефектов	Скважина с проржавевшими обсадными трубами
Вкус	Приятный	Солоноватый	Cl^-	244	720
			SO_4^{-2}	22,8	48
Температура, °С	17,5	17,5	NH_4^+	Нет	21,2
Ca, мг/л	46,4	59,1			
Mg^{2+}	24,2	16,6			

ГЛАВА 16. САНИТАРНАЯ ОХРАНА

16.1. Задачи санитарной охраны

В последнее время отмечаются случаи загрязнения поверхностных и подземных вод. Такие загрязнения связаны в основном со сбросом неочищенных вод в реки, нарушением норм проектирования и строительства, а также эксплуатацией гидротехнических сооружений, в частности водохранилищ и каналов (большие утечки и др.), засолением подземных вод (даже артезианских) при неудовлетворительной эксплуатации оросительных систем (засоление грунтовых и артезианских вод), сбросом в реки минерализованных и соленых вод при горных разработках и др.

Для улучшения качества подземных вод и предупреждения их ухудшения установлены зоны санитарной охраны. Согласно разд. III «Основ водного законодательства Союза ССР и союзных республик» [10] для бытового и хозяйственно-питьевого водоснабжения предусматривается охрана поверхностных и подземных вод от загрязнения с установлением соответствующих зон санитарной охраны для обеспечения их санитарно-эпидемиологической надежности.

В задачи санитарной охраны, таким образом, входит предупреждение загрязнений поверхностных и подземных вод, а также всех сооружений системы водозаборов подземных вод. В эксплуатационные запасы пресных подземных вод во многих случаях входят привлекаемые запасы за счет фильтрации поверхностных вод.

Все санитарные мероприятия выполняются в соответствии с «Основами водного законодательства Союза ССР и союзных республик» и нормативными документами министерств здравоохранения СССР и союзных республик.

Основным документом по организации охраны подземных и поверхностных вод от загрязнения является «Положение о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения хозяйственно-питьевого назначения» [13].

16.2. Зоны санитарной охраны

В соответствии с «Положением о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и хозяйственно-питьевого назначения» установлены три пояса зон санитарной охраны: первый пояс (пояс строгого режима) — на участке водозаборов подземных, а также всех водопроводных сооружений, включая водовод от водозабора подземных вод до распределительной сети потребителя. Второй и третий пояса (пояса ограничений) зон санитарной охраны включают территорию, на которой охраняются от загрязнения источники питания подземных вод и их эксплуатационные сооружения.

В каждой зоне устанавливается специальный режим водохозяйственных и народнохозяйственных мероприятий — строительства и эксплуатации жилых и производственных сооружений, рекреации, других мероприятий. В ряде случаев санитарные охранные мероприятия распространяются и на поверхностные воды, которые являются источником питания подземных вод.

Для участка 1-го пояса зоны санитарной охраны при поверхностных водах в зависимости от местных условий рекомендуется следующая удаленность границ пояса (строгого режима) от водозабора. Для рек и каналов (проточных водоемов) границы должны находиться:

1) вверх по течению — не менее 200 м от водозабора;

2) вниз по течению — не менее 100 м от водозабора;

3) по прилегающему к водозабору берегу — не менее 100 м от линии уреза воды летне-осенней межени;

4) в направлении к противоположному от водозабора берегу при ширине реки или канала менее 100 м — вся акватория и противоположный берег шириной 50 м от линии уреза воды при летне-осенней межени, а при ширине реки или канала более 100 м — полоса акватории шириной не менее 100 м;

5) для непроточных водоемов (водохранилищ, озер) границы первого пояса должны находиться в зависимости от санитарных и гидрологических условий по акватории во всех направлениях не менее 100 м от линии уреза воды в период летне-осенней межени, но на водозаборах ковшового типа в пределы 1-го пояса включается вся акватория этого ковша.

Водозаборы подземных вод, как правило, должны располагаться вне территории промышленных предприятий и жилой застройки. На участке водозаборов из подземных вод границы 1-го пояса зоны санитарной охраны располагаются:

1) для защищенных от загрязнения с поверхности земли подземных вод (напорных) — не менее 30 м от края водозабора;

2) для недостаточно защищенных от загрязнения подземных вод (грунтовых) — на расстоянии 50 м.

Для водозаборов, расположенных на территории объекта при исключении возможности загрязнения почвы и подземных вод, зона 1-го пояса сокращается по согласованию с местными органами санитарно-эпидемиологической службы до 15—25 м.

При ИВПВ граница 1-го пояса должна устанавливаться на расстоянии не менее 50 м от водозабора и не менее 100 м от инфильтрационных сооружений (бассейнов, каналов и др.). В границы 1-го пояса береговых (инфильтрационных) водозаборов подземных вод (кроме питающих их поверхностных вод) следует включить всю прибрежную территорию между водозабором и поверхностными водами. Для подрусловых водозаборов зона 1-го пояса устанавливается, как для поверхностных вод.

Границы 2-го и 3-го поясов зон санитарной охраны для водозаборов с учетом влияния поверхностных вод устанавливаются, исходя из следующих положений. Эти границы должны учитывать природные и, в частности, климатические, гидрологические, а также санитарные условия. Санитарные условия прилегающего района должны соответствовать «Основам водного законодательства СССР и союзных республик» [10].

Границы 2-го пояса должны быть удалены от водозабора, чтобы обеспечить самоочищение поверхностных вод при 95 % обеспеченности расхода проточного водотока и продолжительности движения воды от границы зоны 2-го пояса в течение 3—5 сут в зависимости от климатических, гидрологических и других условий.

При наличии судоходства следует границу акватории считать по линии фарватера. Ниже по течению проточных водоемов границы 2-го пояса устанавливаются на 250 м. Границы 3-го пояса для поверхностных вод в общем совпадают с границами 2-го пояса, но боковые границы устанавливаются на расстоянии 3—5 км, включая притоки, или до линии водораздела.

Границы 2-го и 3-го поясов зон санитарной охраны определяют из условий предупреждения возможности загрязнения поверхностных вод на участке водозабора. Границы 2-го и 3-го поясов зон санитарной охраны водозаборов из подземных вод устанавливают из положения, чтобы в водоносный горизонт на участке водозабора не поступали химические и микробиологические загрязнения. Для этого нужно гидродинамически определять расстояние от внешних границ 2-го пояса, чтобы за время движения воды в водоносном горизонте к водозабору произошло самоочищение. Нужно отметить, что некоторые химические загрязнители очень устойчивы и не поддаются самоочищению. В этом случае следует предусматривать мероприятия, исключающие загрязнение, исходя из времени продвижения загрязнителя и времени эксплуатации водозабора. Границы 3-го пояса зоны санитарной охраны определяют в последнем случае гидродинамическими расчетами, чтобы загрязнение не достигло водозабора подземных вод. В случае устойчивого загрязнителя, не поддающегося самоочищению, срок движения для защиты от химического загрязнения принимается несколько больше срока технической эксплуатации водозабора.

От водозаборов подземных вод к потребителю идут водоводы, которые также должны иметь санитарно-защитную полосу. Эти полосы принимаются по обе стороны от крайних линий водоводов. При отсутствии грунтовых вод при диаметре водоводов до 1000 мм ширина полосы принимается не менее 10 м и при диаметре водовода более 1000 мм — не менее 20 м. При наличии грунтовых вод такая полоса санитарной охраны должна быть не менее 50 м. По согласованию с местными органами санитарно-эпидемиологической службы размер ширины охранной полосы может быть сокращен.

16.3. Проектирование зон санитарной охраны

Проектирование зон санитарной охраны подземных и при необходимости поверхностных вод осуществляют с учетом «Положения о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников хозяйственно-питьевого назначения» [13], «Рекомендаций по гидрогеологическим расчетам для определения границ 2-го и 3-го поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения» [15] и с учетом СНиП 2.04.02—84.

Пояса санитарной охраны устанавливают на основании изучения условий, при которых возможно загрязнение отмеченных выше объектов систем эксплуатации водозаборов, а также результатов анализа поверхностных и подземных вод. При проектировании эти зоны включают в состав проекта водозаборов подземных вод. В процессе эксплуатации осуществляется санитарный надзор с отбором проб и их анализом. В результате могут быть проведены дополнительные санитарные мероприятия. Исследование источников водоснабжения для проектирования охранных санитарных мероприятий ведут по программе, изложенной в прил. 2 к ГОСТ 8761—84 «Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения».

Проектирование зон санитарной охраны выполняют в соответствии со стадиями изысканий и проектирования. При проектировании зон санитарной охраны особенно важно изучить условия и возможности загрязнения подземных вод, а именно: имеющийся или вероятный источник загрязнения и его показатели, длину пути движения подземной воды от источника загрязнения к системе водозаборов, скорости фильтрации, сорбционные свойства пород по отношению к химическим и биологическим загрязнителям, формирование источника загрязнения, а также периоды и продолжительности исходного загрязнения. В проекте зон санитарной охраны для стадий предварительной и детальной разведки следует наметить пояса зон санитарной охраны. При проектировании 2-го и 3-го поясов зон санитарной охраны кроме указанных материалов можно пользоваться «Рекомендациями по расчетам для определения границ 2-го и 3-го поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения» [15], а также работой В. М. Гольдберга и С. Г. Газда [5].

Организация зон санитарной охраны водозаборов подземных вод не даст требуемых результатов без систематического контроля за качеством подземных вод и в случае необходимости поверхностных вод, а также выполнением охранных мероприятий от загрязнения подземных вод. Организация наблюдений за санитарной охраной подземных вод, водозабором и связанными с ними сооружениями, а также в случае необходимости и поверхностными водами должна входить в проект зон санитарной охраны. Такие санитарные наблюдения следует проводить систематически. Общий

санитарный осмотр системы водозаборов подземных вод (в случае необходимости и поверхностных вод), а также участков санитарной охраны следует делать не реже 1—2 раз в месяц.

Государственный санитарный надзор за устройством и эксплуатацией систем водозаборов подземных вод осуществляют органы санитарно-эпидемиологической службы Министерства здравоохранения СССР. Очень важно наметить мероприятия, которые могут учесть неблагоприятное воздействие на качество подземных вод, получаемых водозаборами.

ГЛАВА 17. ИЗМЕНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Изменение производительности водозаборов в общем случае определяется изменением граничных условий водоносного пласта, истощением запасов подземных вод, кольматажем водоприемных частей водозаборных сооружений. Уменьшение дебита водозаборных скважин, изменение соотношения отбираемых расходов во взаимодействующих скважинах и колодцах обусловливают необходимость корректировки проектных данных в течение периода эксплуатации вследствие несоответствия характеристик насосов, заложенных в проекте, изменившимся дебитам и пониженияям уровня в скважинах.

Сохранение гидродинамических параметров водоносных пластов технически, как правило, не обеспечивается, за исключением осуществления мероприятий по искусственному подпитыванию подземных вод на действующих водозаборах. В большей степени возможно поддержание стабильной работы водозаборных сооружений: скважин, колодцев, лучевых водозаборов и т. д. Наибольшая эффективность такого воздействия обеспечивается при правильном установлении причин разведанной (проектной) и действительной производительности водозаборов.

Первая группа причин связана с качеством работ по возведению водозаборных сооружений. Так, при бурении скважин роторным способом с глинистым раствором, роторным способом с прямой или обратной промывкой чистой водой без предотвращения размыва залегающих в верхних частях разреза глинистых прослоев, при установке фильтров со значительным гидравлическим сопротивлением или использовании некачественной гравийной обсыпки велика вероятность глинизации стенок скважины и механический кольматаж фильтров, что может привести к снижению производительности скважин.

При сооружении водоприемной части скважины или любого другого водозаборного сооружения, а также в ходе эксплуатации в пористой среде пород водоносного пласта или гравийной обсып-

ки в отверстиях фильтра накапливается осадок. В результате изменяются структурные показатели пористой среды и уменьшается ее водопроницаемость. При этом степень изменения производительности скважины зависит от насыщения порового пространства кольматажем.

Соотношение текущей κ и начальной κ_0 проницаемостей при кольматаже призабойной зоны скважины может быть описано зависимостью

$$\kappa/\kappa_0 = (w_0/w)^2 (n/n_0)^3,$$

где n и w — соответственно текущие значения пористости и удельной поверхности пористой среды, а n_0 и w_0 — начальные значения этих параметров.

При практических расчетах изменением удельной поверхности пористой среды можно пренебречь и отношение текущей проницаемости к первоначальной можно определить как

$$\kappa/\kappa_0 = (n/n_0)^3$$

или

$$\kappa/\kappa_0 = (1 - a)^3.$$

Здесь a — насыщенность порового пространства осадком $a = b/n_0$ при $b = n_0 - n$ (b — удельный объем отложений кольматажа).

Кольматаж скважин прослеживается в относительно небольшой по размерам зоне, прилегающей к скважине. Заметное изменение проницаемости отмечается на расстоянии не более 1 м от стенки фильтра и обычно влияние зоны с измененной (уменьшенной) проницаемостью учитывается при расчете скважин показателем ее обобщенного сопротивления (показателем скин-эффекта), суммируемым с гидравлическим сопротивлением пласта и с показателями, характеризующими гидродинамическое несовершенство скважин. Величину показателя, обусловленного кольматажем $\xi_к$ в зоне радиусом $r_к$, определяют по формуле

$$\xi_к = \left(\frac{\kappa}{\kappa_0} - 1\right) \ln \frac{r_к}{r_ф},$$

где $r_ф$ — радиус фильтра. Значение κ в период определения $\xi_к$ оценивают по данным о расходе, отбираемом из скважины, и разности понижений уровней в центральной скважине и прифильтровом пьезометре.

Анализ влияния ступенчатого изменения проницаемости в призабойной зоне скважин на приток к ней на основе решения В. Н. Щелкачева показывает, что при измененной проницаемости призабойной зоны скважины за счет создания гравийной обсыпки наиболее интенсивное приращение притока при прочих равных условиях наблюдается при $r_к/r_ф = 3$, далее же темп изменения сопротивления и расхода скважины становится меньше, т. е. значительное увеличение отношения $r_к/r_ф$ не приводит к существенному улучшению гидравлических характеристик скважины. При $r_к/r_ф > 10$ величина сопротивления призабойной зоны остается практически постоянной и равной 4,5 при проницаемостях гравий-

ной обсыпки и фильтра, отличающихся в 20 раз. Однако такой анализ может рассматриваться лишь как приближенный. В действительности же специфика работы гравийных фильтров скважин заключается в том, что в контактной зоне водоносных пород и гравия возникают местные гидравлические потери, обусловленные наложением пород различной проницаемости и процессами кольматажа обсыпки. Как правило, проницаемость обсыпки в начальный период работы скважины увеличивается от контакта гравия с песком к стенке фильтра. В дальнейшем при химическом кольматаже распределение проницаемости в пределах обсыпки изменяется и наименьшую проницаемость приобретает слой гравия или породы, непосредственно контактирующий с каркасом фильтра. Изменение проницаемости гравия, находившегося в контакте с песками, подчиняется экспоненциальной зависимости. Параметры этой функции зависят в свою очередь от коэффициента межслойности гравия и песка, определяющего механический кольматаж.

Рассмотрим влияние зоны ограниченного размера вблизи скважины на приток к ней и величину сопротивления, проницаемость внутри которой изменяется по закону

$$\kappa(r) = k_{\text{п}} + (\kappa_0 - k_{\text{п}}) \exp\left\{-\alpha \frac{r_{\text{к}} - r_{\text{ф}}}{r_{\text{ф}}}\right\}, \qquad (17.1)$$

где $k_{\text{п}}$ — коэффициент фильтрации пласта; κ_0 — начальная проницаемость гравийного фильтра; α — параметр функции.

Обычно в полевых условиях легко реализуется определение некоторого среднего значения коэффициента фильтрации, которое учитывает все структурные изменения, происшедшие в процессе механического кольматажа. Таким образом, проницаемость призабойной зоны можно представить следующей величиной:

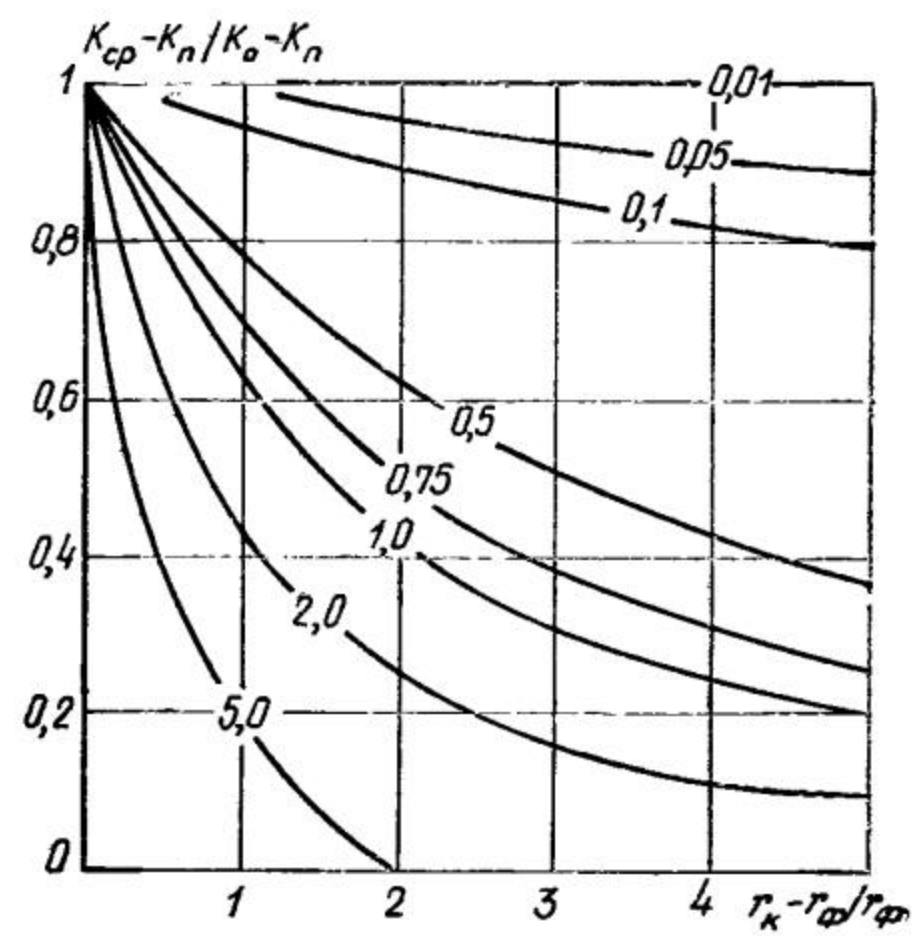
$$\kappa_{\text{ср}} = \frac{1}{r_{\text{к}} - r_{\text{ф}}} \int_{r_{\text{ф}}}^{r_{\text{к}}} \kappa(r)\, dr. \qquad (17.2)$$

В соответствии с (17.1) среднее значение проницаемости для зависимостей (17.2) составит

$$\kappa_{\text{ср}} = k_{\text{п}} + \frac{\kappa_0 - k_{\text{п}}}{\dfrac{r_{\text{к}} - r_{\text{ф}}}{r_{\text{ф}}}} \frac{1}{\alpha} \cdot \left[1 - \exp\left(-\alpha \frac{r_{\text{к}} - r_{\text{ф}}}{r_{\text{ф}}}\right)\right]. \qquad (17.3)$$

При $\alpha \frac{r_{\text{к}} - r_{\text{ф}}}{r_{\text{ф}}} \leqslant 1$ можно ограничиться двумя членами разложения экспоненты в ряд и при этом из (17.3) получим, что $k_{\text{п}} = \kappa_0$. При малых значениях α проницаемость прифильтровой зоны близка к начальной проницаемости незакольматированного гравийного фильтра (рис. 17.1). По мере увеличения коэффициента α наблюдается заметное уменьшение средней проницаемости обсыпки. Параметр α характеризует степень механической кольматации обсыпки частицами водоносной породы.

Рис. 17.1. Изменение среднего значения коэффициента фильтрации в зависимости от α



Потери напора в призабойной зоне скважины описывает уравнение

$$\Delta s = -\int_{r_ф}^{r_ф} i dr. \qquad (17.4)$$

Учитывая, что проницаемость в пределах прифильтровой зоны претерпевает изменения в результате механического кольматажа, получим следующее выражение для потерь напора:

$$\Delta s = \frac{Q}{2\pi m} \int_{r_ф}^{r_ф} \frac{dr}{r\kappa(r)}. \qquad (17.5)$$

Интегрирование уравнения (17.5) с учетом (17.3), т. е. без осреднения проницаемости согласно (17.2), выполнено численным методом с применением ЭВМ М-22. Интегрирование производилось при $r_к=0{,}4$ для различных значений $r_ф$ и с изменением параметра кольматации α в каждом интервале интегрирования.

Результаты расчетов показывают, что с гидравлической точки зрения при заданном диаметре бурения увеличение радиуса фильтра во всех случаях при прочих равных условиях обусловливает уменьшение потерь напора и увеличение притока к скважине. Учитывая отмеченное явление уменьшения гидравлических потерь с уменьшением величины $r_к/r_ф$, при проектировании скважин необходимо исходить из условия максимального увеличения диаметра каркаса фильтра. С другой стороны, при $r_к/r_ф>5$ интенсивность возрастания сопротивлений скважины существенно увеличивается и максимальное значение сопротивления может быть приближенно определено с использованием этого критерия. Следовательно, при всемерном увеличении диаметра фильтра-каркаса определяющими должны являться суффозионные критерии при проектировании скважин.

Существенным при проектировании и строительстве водозаборных скважин и других водозаборов является и степень неравномерности механической кольматации гравийных или блочных фильтров. Опыт показывает, что величина α для различных конструкций фильтров изменяется в значительных пределах: от 0,5 — для фильтров с рыхлой обсыпкой до 5—10 — при применении блочных конструкций или с водоприемной поверхностью из нетканых материалов. Физически это объясняется накоплением в зоне, контактирующей с водоприемной поверхностью, тонкозернистых или глинистых частиц при прокачке скважины. При рыхлой гравийной обсыпке это явление присуще фильтрам с малым коэффициентом межслойности (менее 5).

Прослеживающиеся в ходе эксплуатации процессы химического и биологического кольматажа интенсивнее происходят при увеличении параметра α или возрастании начальной неравномерности изменения водопроницаемости прифильтровой зоны. При эксплуатационном кольматаже вследствие нарушения гидрогеохимических условий в водоносном пласте, смещения щелочно-кислотного равновесия изменяется окислительно-восстановительное состояние подземных вод, в зоне максимальных скоростей вблизи скважины в прифильтровой зоне отлагаются нерастворимые в воде соединения. Наиболее неустойчивым оказывается равновесие железосодержащих, карбонатных и серосодержащих соединений. Процессы химического кольматажа интенсифицируются в зоне контакта металлического фильтра.

В прифильтровой зоне в условиях контакта подземных вод с атмосферным воздухом, парциальное давление углекислого газа в котором ничтожно мало, и понижения давления происходит десорбция свободной углекислоты из подземных вод. Параллельно в подземных водах, обычно обедненных кислородом, наблюдается его поглощение из воздуха, в результате чего Fe^{2+} окисляется до Fe^{3+} с образованием $Fe(OH)_3$ — основного кольматирующего соединения.

Аналогично образуются отложения труднорастворимого гидроксида марганца в порах и на фильтре. Избыток карбонат-ионов при диссоциации HCO_3^- связывается катионами кальция, всегда присутствующими в водоносных пластах, каптируемых при водоснабжении.

Следовательно, процесс химического кольматажа призабойных зон скважин при заборе гидрокарбонатно-кальциевых вод контролируется содержанием соединений железа, марганца, двуокиси кремния и их стабильностью.

Для определения возможности течения реакции разложения бикарбонатов железа и выпадения карбоната кальция необходим расчет стабильности подземных вод в естественном состоянии. Наиболее удобно на основе данных химического анализа воды рассчитывать величины pH_s, отвечающие равновесному состоянию в растворе углекислых соединений. Если фактическая величина pH

данной воды ниже pH_s, это является результатом избытка в растворе CO_2 над равновесной концентрацией. Такие воды способны растворять карбонатные образования. При значениях pH данной воды выше pH_s содержание CO_2 в ней меньше равновесной концентрации и она способна выделять из раствора осадок карбоната кальция. Величина pH_s определяется по СНиП 2.04.02—84.

Показателем стабильности воды и способности к выделению осадков является индекс насыщения, равный разности между фактически измеренной величиной pH и pH_s:

$$I = pH - pH_s. \qquad (17.6)$$

Большой объем исследований по изучению устойчивости карбонатных систем был проведен Ризнером, который определял возможность выделения карбоната кальция в системах оборотного водоснабжения при различных соотношениях pH равновесного насыщения и действительной величиной pH подземных вод:

$$Ri = 2pH_s - pH. \qquad (17.7)$$

Экспериментами установлено, что при $Ri<7$ воды всегда склонны к выделению кольматирующих образований. Выделение CO_2 в прифильтровой зоне приводит к повышению pH, при этом наиболее интенсифицируется гидролиз бикарбоната железа и увеличивается скорость окисления закисного железа. При $pH=7...8$ скорость окисления железа соизмерима со скоростью течения воды в прифильтровых зонах скважин. При более глубоком удалении свободной углекислоты разложение бикарбонатов приводит не только к образованию $Fe(OH)_3$, но и к выпадению из раствора карбонатов кальция и магния. Процесс кольматажа фильтров соединениями железа будет идти только в окислительной обстановке при наличии в водах кислорода, необходимого для перевода иона железа в трехвалентную форму. Аэрация же подземных вод наиболее интенсивно происходит в непосредственной близости от скважины. Кроме того, в отдельных случаях окисление закисного железа осуществляется за счет кислорода, содержащегося в незначительных концентрациях в воде, при интенсивном перемешивании, вызванном турбулизацией потока в гравийной обсыпке и фильтре.

Увеличение pH и аэрации в прифильтровой зоне приводит к выделению из подземных вод сульфидов металлов. Особенно интенсивно эти процессы прослеживаются при взаимодействии сероводородсодержащих вод с металлическими элементами фильтров. Характерные ассоциации кольматирующих отложений обнаружены при эксплуатации водозаборных скважин в Западной Сибири, где в составе кольматанта преобладают железофосфатные комплексы.

Для качественного прогноза кольматажа представляется рациональным разделить подземные воды в соответствии с их способностью к выделению закупоривающих отложений на следующие типы.

1. Агрессивные подземные воды, не содержащие железа с отрицательным индексом насыщения карбонатом кальция, в которых процессы кольматажа при отсутствии аэрации или даже при наличии некоторого подсоса воздуха в прифильтровую зону развиваются очень медленно и их можно не принимать во внимание.

2. Железосодержащие воды с положительным индексом насыщения, в которых, как правило, нет растворенного кислорода, и стабильные воды при полной изоляции водной поверхности от атмосферного воздуха (самоизливающиеся скважины), характеризуются медленным течением процесса зарастания при интенсивном водоотборе.

3. Железосодержащие воды с положительным индексом насыщения и стабильные воды, при всех способах водоотбора способные к интенсивному выделению кольматирующих соединений.

4. Воды, не содержащие железа с высоким положительным значением индекса насыщения. В этом случае в прифильтровых зонах скважин и дренажей отлагается карбонат кальция.

5. Воды, содержащие кремнекислоту. В прифильтровой зоне скважины создаются условия, благоприятные для ее коагуляции, в результате чего образуются коагели взаимного осаждения кремнекислоты с гидроокисью железа.

6. Воды, содержащие сероводород, характеризуются, как правило, развитием кольматационных процессов с отложением на фильтре и в прифильтровой зоне сульфидов металлов.

7. Воды с железофосфатными соединениями при эксплуатации водозаборных сооружений характеризуются образованием в прифильтровой зоне специфических аморфных железофосфатных компонентов.

На стадии детальных гидрогеологических исследований с использованием охарактеризованных критериев следует давать предварительный качественный прогноз возможности и предполагаемой интенсивности кольматационных процессов. Очевидно, нет смысла при этих исследованиях проводить длительные откачки с целью оценки интенсивности снижения производительности скважин в связи с кольматажем. Решение этих вопросов более целесообразно осуществлять в начальный период эксплуатации водозаборных систем или методом аналогии.

Профилактические мероприятия, позволяющие несколько снизить интенсивность процессов химического кольматажа, следует предусматривать как при конструировании скважин, так и в процессе их работы. При эксплуатации скважин в водоносных горизонтах с подземными водами, склонными к выделению кольматирующих образований, следует избегать неравномерного режима эксплуатации, в результате которого происходит аэрация подземных вод, надежно герметизировать устья скважин, исключать использование эрлифтных водоподъемников, проверять работу обратных клапанов погружных насосов с тем, чтобы предотвратить поступление аэрированных вод в интервал установки фильтра.

Кардинальное решение вопроса о предотвращении химического кольматажа скважин может быть обеспечено лишь при создании специальной защиты водозаборных скважин — путем проходки вокруг них вспомогательных скважин, в которые подается аэрированная вода. При этом кольматант отлагается в удаленных от скважины зонах и интенсивное снижение ее производительности таким образом может быть предотвращено. В общем случае следует отметить, что профилактические мероприятия не исключают химического кольматажа фильтров и прифильтровых зон скважин и при наличии этих процессов необходимо предусматривать регулярную регенерацию скважин на основе прогноза снижения их производительности.

Процессы химического кольматажа, происходящие в прифильтровых зонах скважин, интенсифицируются микробиологическими процессами. Основной причиной этого являются железо- и марганцевые бактерии, которые в нескольких видах присутствуют во всех водоносных породах и подземных водах и в результате жизнедеятельности осаждают железо и марганец из подземных вод.

Для практических целей важно знать необходимые условия развития железобактерий с тем, чтобы иметь возможность прогнозировать биологический кольматаж скважин и назначать специфические способы их регенерации. Для развития железо- и марганцевых бактерий величина pH должна находиться в пределах 5,4—7,2. Содержание Fe^{2+} в воде не должно быть меньше 1.6 мг/л и не превышать 10—12 мг/л, так как при концентрации закисного железа более 14 мг/л рост бактерий невозможен. Подземная вода должна содержать углекислоту.

В подземных водах бактерии обычно появляются при концентрации кислорода более 5 мг/л. Такое содержание не является минимальным, так как в подземных водах всегда присутствуют сульфаты и нитраты, которые при разложении их сульфатредуцирующими и денитрифицирующими бактериями освобождают кислород. Критерием, определяющим более точно возможность развития железо- и марганцевых бактерий, является показатель давления недиссоциированных водородных ионов в воде, связывающий Eh и pH:

$$rH = \frac{Eh}{0,029} + 2pH. \qquad (17.8)$$

Это соотношение справедливо при $rH = 5 \ldots 25$. В общем случае для массового развития железо- и марганцевых бактерий и, следовательно, биологического кольматажа необходимо выполнение следующих условий.

1. Наличие железо- и марганцевых бактерий.

2. Наличие Fe^{2+} или Mn^{2+} в подземных водах. Минимальная концентрация, равная 1,6 мг/л, может быть принята в расчет только для условий застойной воды. В проточной воде железобактерии развиваются и при меньшей концентрации железа.

3. Окислительно-восстановительные условия должны характеризоваться величинами Eh>—10±20 мВ, а rH=14,5±1. Процесс развития бактерий интенсифицируется с увеличением скорости фильтрации, так как в этом случае увеличивается интенсивность поступления питания Fe^{2+}, Mn^{2+} к бактериям.

Тенденция подземных вод к биологическому кольматажу скважин может быть определена на основе комплексных биологических и химических исследований. Для биологических исследований в скважинах при опытно-фильтрационных работах необходимо устанавливать предметные стекла и выдерживать их там в течение четырех недель. После этого стекла извлекают и анализируют под микроскопом. Параллельно проводят химические анализы подземных вод. На основе обобщения результатов бактериологических и химических анализов подземных вод может быть сделан вывод о возможности биологического кольматажа фильтров и прифильтровых зон скважин.

При получении сведений о возможности развития железобактерий в фильтре и прифильтровой зоне скважин следует предусматривать профилактические мероприятия по поддержанию их стабильной работы. Наиболее доступный способ — периодическое хлорирование скважин с остаточной концентрацией хлора 5—7 мг/л [4]. При этом возможно хлорирование скважин путем подачи воды с хлором из напорного водовода (при снятом обратном клапане погружного насоса). После введения раствора хлорной извести в скважину целесообразно включить насос на 30—50 мин и затем отключить его с тем, чтобы был обработан не только фильтр, но и прифильтровая зона скважины. Однако периодичность хлорирования фильтров скважин для подавления деятельности железо- и марганцевых бактерий необходимо устанавливать конкретно для каждого объекта работ. По имеющимся данным, хлорирование целесообразно осуществлять 1 раз в 3—4 мес.

Более устойчивый эффект на длительные периоды времени обеспечивает установка в фильтре специального источника гамма-лучей [4]. В качестве такого источника опробовано применение радиоактивного кобальта и цезия, помещенных в герметично закрытом излучателе. Защитное действие гамма-облучения против биологического кольматажа скважин обеспечивается при интенсивности излучения 100 рад/ч.

Вне зависимости от природы кольматажа скважин закономерности изменения их производительности определяются интенсивностью накопления кольматанта в пористой среде и размеров зоны кольматажа. Изменение во времени коэффициента фильтрации в зоне кольматажа $k(t)$ может быть задано формулой

$$k(t) = k_0 e^{-t/\tau}, \qquad (17.9)$$

где τ — время релаксации, равное $1/c_0\gamma$ (c_0 — начальная конструкция кольматирующих соединений в воде, γ — коэффициент кольматации).

При величине грязеемкости N, равной пористости

$$k(t) = k_0 e^{-3c_0\gamma t}. \qquad (17.10)$$

Соответственно понижение уровня в скважине определяется соотношением

$$s = \frac{Qe^{3c_0\gamma t}}{2\pi km} \ln \frac{R_п}{r_0}, \qquad (17.11)$$

где Q — расход откачки; m — мощность пласта; $R_п$ — радиус влияния; r_0 — радиус скважины.

Следовательно, удельный дебит определяется выражением

$$q = q_0 e^{-3c_0\gamma t}. \qquad (17.12)$$

Оно справедливо при предположении, что коэффициент фильтрации изменяется в пределах всей области пласта, где распространяется возмущение от действия скважины.

Можно представить, что кольматаж наиболее интенсивно проявляется в непосредственной близости от скважины в области $r_0 - r_c$ (r_0 — радиус фильтра и r_c — радиус бурения скважины), а за пределами этой области при $r > r_c$, коэффициент фильтрации пород не изменяется. Это предположение оправдывается тем обстоятельством, что зона кольматажа, как правило, невелика и не превышает 0,5—0,7 м [4]. Решение задачи о притоке воды к скважине при наличии вблизи нее зоны с кольцевой неоднородностью, где $k(t)$ есть функция времени, имеет вид

$$s = \frac{Q}{2\pi km}\left[\ln \frac{R_п}{r} + \xi_к\right], \qquad (17.13)$$

где

$$\xi_к = \left(-\frac{k_п}{k_ф} - 1\right) \ln \frac{r_c}{r_0}, \quad k_ф = k^0{}_ф \left[1 - \frac{N}{n}\left(1 - e^{-3c_0\gamma t}\right)\right]^m \qquad (17.14)$$

и, следовательно, удельный дебит скважины равен:

$$q(t) = \frac{2\pi km}{\ln \frac{R_п}{r_c} + \xi_к}. \qquad (17.15)$$

При $N/n_0 = 1$

$$\xi_к = \left[\frac{k}{k^0{}_ф} e^{3c_0\gamma t} - 1\right] \ln \frac{r_c}{r_0}. \qquad (17.16)$$

Для оценки параметров кольматажа уравнение приводится к виду

$$\lg y = \lg \frac{k}{k^0{}_ф} + \beta t, \qquad (17.17)$$

где

$$y = \frac{\xi_к}{\ln \frac{r_c}{r_0}} + 1, \quad \beta = 1{,}305 c_0 \gamma.$$

Величина β определялась в различных гидрогеологических условиях на основе длительных наблюдений за изменением удельных дебитов водозаборных скважин и показателей их гидравлического сопротивления. По 35 скважинам в береговой зоне Краснодарского водохранилища значения β изменялись в пределах $1{,}1 \cdot 10^{-2}$—$8 \cdot 10^{-2}$ при среднем значении $4{,}5 \cdot 10^{-2}$. Оценки этого неравенства в целом по водозабору по 208 скважинам дали значение $\beta = 2 \cdot 10^{-2}$, что характеризует аналогичную по темпам тенденцию снижения производительности в связи с кольматажем.

Аналогичные расчеты, проведенные для скважин водозабора «Балтэзерс» г. Риги, каптирующих отложения Балтийского моря, позволили определить величину $\beta = 2{,}0 \cdot 10^{-2}$. Осредненные значения β в различных гидрогеологических условиях в Поволжье, Приднепровье, на городских водозаборах Курска, Воронежа, Печоры, объектах сельхозводоснабжения по данным 188 эксплуатационных скважин изменяются от $1{,}4 \cdot 10^{-2}$ до $4{,}5 \cdot 10^{-2}$.

Исходя из нормативного значения $\beta = 2{,}0 \cdot 10^{-2}$ при проектировании скважин может быть принята величина межремонтного периода скважин в пределах 2—3 лет. Максимальные значения межремонтного периода принимаются для скважин, оборудованных высокопроницаемыми фильтрами с рыхлой гравийной обсыпкой.

ГЛАВА 18. РЕМОНТ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

18.1. Методы восстановления производительности скважин

Эффективная работа водозаборов подземных вод при наличии процессов кольматажа возможна только при условии обязательного проведения восстановительных мероприятий. Основное назначение ремонтно-восстановительных работ — поддержание стабильной эксплуатации водозаборных сооружений. Успех этих работ обеспечивается обоснованным выбором межремонтного периода. По мере его увеличения усложняется технология обработки водозаборных сооружений и увеличивается ее стоимость. Технология восстановления производительности скважин подробно описана в [1, 2]. В связи с этим охарактеризуем принципиальные основы восстановительных мероприятий и их применения при эксплуатации водозаборов.

Основной задачей работ при восстановлении производительности скважин на воду, оборудованных фильтрами, является удаление кольматирующих отложений с фильтра и из прифильтровой зоны. При этом главная трудность заключается в удалении кольматанта с наружной поверхности фильтра и из гравийной обсыпки (водоносных пород). Решение этой задачи достигается растворением кольматирующих отложений при подаче реагента в призабойную зону скважины либо таким разрушением кольматанта и цемента обрастания, при котором размер образующихся кольматирующих частиц становится меньше размера пор гравийной обсыпки и они выносятся при последующей или одновременной с импульсным воздействием прокачке.

Следовательно, если исключить методы очистки внутренней поверхности фильтра, то по характеру воздействия на фильтр и прифильтровую зону можно выделить две основные группы методов: реагентные и импульсные (рис. 18.1).

Первая группа из этих методов предназначена для растворения кольматанта, и задачей технологических исследований является подбор вида реагента, его количества, обоснование рациональной технологии обработки в зависимости от гидрогеологических условий и конструкции скважины, надежного метода контроля хода обработки и критерия для оценки ее окончания.

При осуществлении импульсной регенерации необходимо оценить возможную степень дробимости образований в прифильтровой зоне и декольматации скважин при осуществлении обработки при минимальных энергетических затратах, а также при условии обеспечения сохранности самого фильтра. Сочетание импульсных и реагентных методов призвано обеспечить большую эффективность вследствие создания более равномерной водопроницаемости пород в прифильтровой зоне по вертикали и развитой поверхности кольматанта при импульсном воздействии, что обеспечивает интенсивное и совершенное растворение внутрипорового цемента.

Импульсное воздействие на скважины является одним из наиболее часто применяемых методов регенерации. Это обусловлено простотой применяемого оборудования и ощутимым эффектом, достигаемым после относительно нетрудоемких работ. Для освоения и регенерации водозаборных скважин в настоящее время используется взрыв торпед из детонирующего шнура (ТДШ), осуществление в скважине электрогидравлического удара, пневмовзрыва и имплозии. Близкое по характеру воздействие скважина испытывает при пульсирующей прокачке эрлифтом, пусках-остановках погружных насосов, свабировании, гидравлических ударах в фильтре, создаваемых сбрасыванием в него желонки или какого-либо другого посыльного груза, а также созданием взрывной смеси газов непосредственно на забое восстанавливаемой скважины. Для взрывной обработки применяют торпеды ТДШ (ТДШ-50, ТДШ-25, ТДШ-В) с детонирующим шнуром марки ДШ-В или ДШУ-В, а

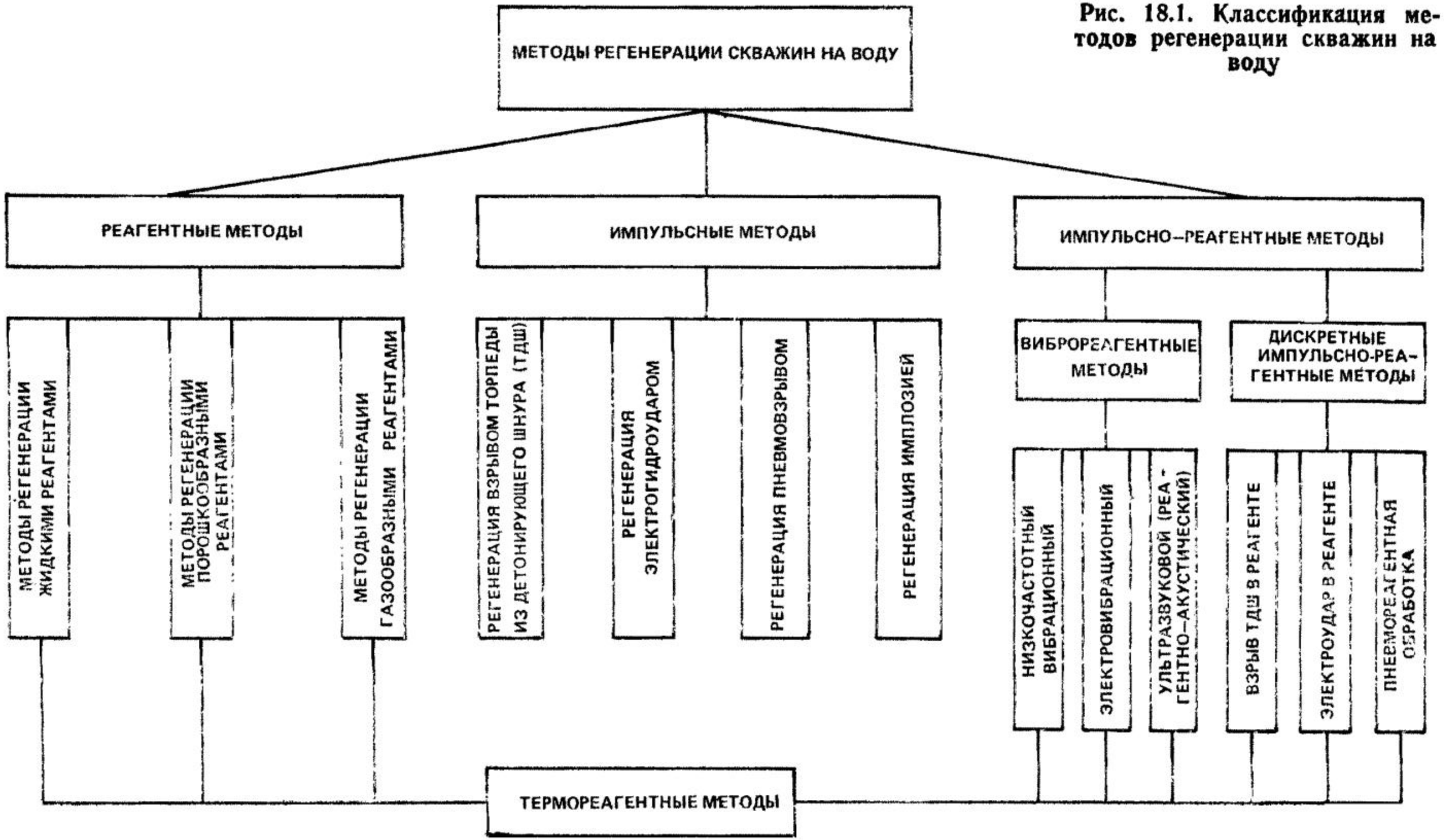


Рис. 18.1. Классификация методов регенерации скважин на воду

также фугасные торпеды типа ТШ или Ф-2, обеспечивающие создание давления на фильтре до 30—40 МПа.

В скважинах, оборудованных металлическими фильтрами (трубчатыми, каркасно-стержневыми, спирально-проволочными) на рыхлые водоносные отложения, детонирующий шнур взрывают в одну нитку. При оборудовании скважин фильтрами с сетчатой водоприемной поверхностью, блочными и пластмассовыми конструкциями применять взрыв детонирующего шнура не рекомендуется. Установлено, что наиболее эффективно применение взрыва ТДШ в скважинах, эксплуатировавшихся до восстановительных мероприятий не более 2—5 лет. При взрыве ТДШ в скважине в период эксплуатации более 3 раз резко возрастает вероятность разрушения фильтра и выхода скважины из строя. В скальных водоносных породах с установленным в них трубчатым или каркасно-стержневым фильтром используют фугасные торпеды или ТДШ из 2—3 ниток.

Электрогидравлическая обработка осуществляется на базе использования специализированных установок, обеспечивающих создание электрогидравлического удара (ЭГУ) по длине фильтра. При этом на стенку фильтра создается давление до 5—6 МПа. Возможность регулирования величины импульсов и их количества существенно расширяет область применения этого метода, использование которого возможно в менее прочных конструкциях фильтров, в том числе с сетчатой водоприемной поверхностью или в пластмассовых фильтрах. При ЭГУ-обработке в скважинах, оборудованных трубчатыми, каркасно-стержневыми фильтрами с водоприемной поверхностью из проволоки или штампованного листа, достаточно проведения 300—500 импульсов на 1 п. м фильтра, для сетчатых фильтров — 100—200 импульсов. В скальных и полускальных породах, оборудованных перфорированными трубами, количество импульсов на 1 п. м необсаженного или перфорированного забоя должно быть не менее 500.

Пневмоимпульсное воздействие обеспечивается специализированными установками АСП-Т и АВПВ-150, создающими с помощью сжатого при высоком давлении воздуха в стволе скважины волны повышения давления интенсивностью до 4 МПа и фильтрационные потоки с высокими градиентами (табл. 18.1).

В полускальных и скальных породах при обработке скважин создают максимально возможное давление в воздухосборнике и при максимальном объеме пневмокамеры, а количество импульсов на 1 п. м фильтра должно быть не менее 10.

Существенный эффект может быть достигнут при газовом взрыве и других импульсных воздействиях. Опыт импульсной регенерации скважин на воду достаточно велик и позволяет с достаточной надежностью сделать вывод о возможности восстановления производительности скважин до 40—70 % первоначальной при межремонтном периоде в условиях последующей эксплуатации не менее 1 года.

Таблица 18.1. Технологические параметры пневмоимпульсной обработки

Тип фильтра	Технологические параметры	Диаметр фильтра, мм		
		168	219	273
Сетчатый	Объем пневмокамеры, л	0,3	0,5	1
	Давление в воздухосборнике, МПа/см²	4—6	6—8	8—10
	Число импульсов на 1 п. м фильтра, шт.	2—3	3—5	5—8
Каркасно-стержневой (спирально-проволочный) с проволочной обмоткой или с штампованным листом	Объем пневмокамеры, л	0,3	0,5	1
	Давление в воздухосборнике, МПа/см²	10—15	10—15	10—15
	Число импульсов на 1 п. м фильтра, шт.	4—5	5—8	8—12

Реагентная обработка скважин используется в практике водоснабжения в СССР более 30 лет. Растворение кольматирующих отложений в прифильтровой зоне и фильтре водозаборных скважин позволяет добиться при соответствующих гидродинамических условиях и составе кольматанта практически первоначальной производительности скважин. Наиболее распространенным и легкодоступным раствором является соляная кислота, однако в настоящее время подобран ряд композиций реагентов, позволяющих проводить обработки практически во всех гидрогеологических условиях и при разных конструкциях фильтров. Подбор реагента осуществляют по табл. 18.2 в соответствии с составом кольматанта и типом фильтра.

Устойчивость фильтров в кислотах характеризуется в технических условиях на их производство и применение, состав кольматанта на фильтрах и в пласте идентифицируется по осадкам, отобранным с водоподъемных труб или насосов, однако в большинстве случаев в составе кольматанта преобладают гидроксиды железа. В целях предотвращения коррозии в ходе обработки в соляную кислоту вводят ингибиторы катапин-А или катапин-Б в концентрациях соответственно 0,5 и 0,05 %. Эти ингибиторы допущены к использованию в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения.

При прочих равных условиях наибольшая эффективность обработок достигается при применении соляной кислоты (композиции *1* и *7* (см. табл. 18.2), близок к ней по степени растворения дитионит натрия (композиция *5*). Растворяющая способность раствора гидразина соляно-кислого (композиция *2*) составляет 60%, бисульфата натрия водного (композиция *4*) — 40 %, раствора сульфаминовой кислоты — 10 % растворяющей способности соля-

Таблица 18.2. Условия применения реагентов при регенерации водозаборных скважин

№ п. п.	Реагенты		Состав кольматанта	Устойчивость фильтра и обсыпки к кислотам
	Композиция	Концентрация, %		
1	$HCl+Na_5P_3O_{10}$	20...25+0,1	Fe_2O_3, $Fe(OH)_3$, $FeCO_3$, FeS, $CaCO_3$, $MgCO_3$	Кислотоустойчивы
2	$N_2H_4 \cdot 2HCl+Na_5P_3O_{10}$	8...10+0,1	То же	То же
3	$NH_3O_3H+Na_5P_3O_{10}$	8...10+0,1	»	»
4	$NHSO_4 \cdot H_2O+Na_5P_3O_{10}$	5...7+0,1	Fe_2O_3, $Fe(OH)_3$, $FeCO_3$, Fe	»
5	$Na_2S_2O_4+Na_5P_3O_{10}$	6...8+1	Fe_2O_3, $Fe(OH)_3$,	Неустойчивы
6	$Na_5P_3O_{10}$ или $(NaPO_4)_6$	5...8	Fe_2O_3, $Fe(OH)_3$, $FeCO_3$, $CaCO_3$, $MgCO_3$	То же
7	$HCl+Na_5P_3O_{10}$	5...10+2,5	То же и FeS	Устойчивы в разбавленной кислоте

ной кислоты. Все перечисленные реагенты, за исключением соляной кислоты, порошкообразные.

Для обработки одной водозаборной скважины требуется в зависимости от диаметра и длины фильтра от 300 до 1100 кг HCl соответственно при диаметрах 6″ и 12″ и порошкообразных реагентов в тех же условиях от 25 до 80 кг. Технология реагентной регенерации скважин детально изложена в ряде изданных руководств [17] и монографий [2, 4]. Отметим, что возможны две ее реализации: реагентная ванна и циклическое задавливание, обеспечивающее возвратно-поступательное движение реагента в прифильтровой зоне.

Способ реагентной ванны используют при глубоком залегании уровня подземных вод (более 30 м). Ее рекомендуемая продолжительность 10—12 ч. Регенерация герметизированных скважин более эффективно обеспечивается циклической обработкой. При этом возвратно-поступательное движение создается путем последовательного повышения и снятия давления или вакуумированием скважины с последующей ее разгерметизацией. Превышение давления над естественным пластовым должно составлять 0,15—0,2 МПа/см² при продолжительности задавливания в пределах

10 мин и снятия давления до 5 мин. Общая продолжительность обработки в этом режиме обычно не превышает 2 ч. По рассматриваемой технологии восстановлено около 10 тыс. водозаборных скважин. Более 20 лет она успешно применяется на водозаборах г. Риги, где нормативный срок службы скважин благодаря этому превышен в 2 и более раз.

В составе кольматирующих образований фильтров и прифильтровых зон на водозаборах г. Риги преобладают соединения железа (Fe_2O_3 находится в пределах 73,3—80,4 %), соединения кальция, магния и других компонентов играют подчиненную роль.

Восстановление производительности скважин водозаборов производилось циклическим задавливанием монореагентов (соляной кислоты, триполифосфата натрия) и полиреагентов (подкисленного раствора триполифосфата натрия, соляной кислоты и раствора дитионита натрия со стабилизирующими добавками фосфатов).

Кислотные растворы (соляная кислота, подкисленный раствор фосфатов) готовились в заливочной емкости, приготовление растворов из порошкообразных реагентов (дитионит и триполифосфат натрия) производилось непосредственно в стволе скважины при помощи сжатого воздуха, подаваемого в нижнюю часть фильтра. Задавливание раствора за контур фильтра осуществлялось давлением сжатого воздуха не выше 0,16 МПа в течение 5—15 мин с последующим сбросом давления (3—5 мин). Время окончания обработки скважин определялось по стабилизации данных о восстановлении уровня жидкости в стволе скважины в процессе циклической обработки, что свидетельствует о предельно возможном уменьшении насыщенности порового пространства кольматантом (при избытке реагента). В общем случае время обработки в зависимости от вида реагента и количества кольматанта изменялось от 60 до 160 мин. Время прокачки скважин после обработки не превышало 2 ч. На водозаборах г. Риги было обработано 384 скважины (табл. 18.3).

В результате обработок удельный дебит увеличился у скважин с гравийно-клеевыми фильтрами в 2 раза; с керамическими в 1,9; с гравийно-проволочными в 1,8; с фильтрами конструкции Тима в 1,8 раза и в целом по водозаборам в 1,9 раза.

Характерно, что эффективность реагентных обработок оказывается максимальной при их проведении в период 2—3 лет после начала эксплуатации скважин. Так, по одному из водозаборов в долине р. Волги (рис. 18.2) было получено, что наиболее целесообразно проводить циклическую реагентную регенерацию не позднее, чем через 5 лет работы скважин при межремонтном периоде не более 2 лет. При более длительном сроке эксплуатации скважин перед регенерацией необходимо более интенсивное импульсно-реагентное или термореагентное воздействие.

Импульсно-реагентные методы сочетают импульсное воздействие с последующей или одновременной реагентной обработкой.

Рис. 18.2. Эффект восстановления удельного дебита скважин Куйбышевского водохранилища в зависимости от срока их эксплуатации при циклической реагентной обработке

Таблица 18.3. Эффективность циклических реагентных обработок скважин водозаборов г. Риги

Реагент	Число скважин	Тип фильтра	Увеличение удельного дебита, раз
		Балтэзерс	
Соляная кислота 27%	26	Керамический	1,6
	9	Конструкции Тима	1,2
Соляная кислота со стабилизирующими добавками фосфатов	36	Керамический	2
	14	Конструкции Тима	2,1
Соляная кислота 5% и триполифосфат натрия 3%	25	Гравийно-клеевой	2
	4	Керамический	—
	10	Конструкцин Тима	—
		Балтэзерс-I	
Соляная кислота 27%	22	Керамический	2,5
	8	Конструкции Тима	1,9
Соляиая кислота со стабилизирующими добавками фосфатов	26	Керамический	1,6
Соляная кислота 5% и триполифосфат натрия 3%	12	Гравийно-клеевой	2
		Закюмуйжа	
Соляная кислота 27%	8	Керамический	2,2
	16	Конструкции Тима	—
Соляная кислота со стабилизирующими добавками фосфатов	22	Керамический	1,6
		Ремберги	
Соляная кислота 27%	30	Керамический	1,6
Соляная кислота со стабилизирующими добавками фосфатов	33	»	1,6
		Гауя-I	
Соляная кислота 27%	13	Гравийно-проволочный	2
Соляная кислота со стабилизирующимн добавками фосфатов	65	То же	1,7

При этом различают виброреагентную регенерацию, сочетающую импульсное вибрационное воздействие с реагентами и проведение дискретного импульса с реагентной обработкой. Виброреагентная

обработка проводится на базе разработанных В. В. Верстовым вибраторов типа ВУР при наличии забойного рабочего органа. Этот вид обработки возможен в сочетании со всеми видами реагентов.

Однако относительно низкие значения гидродинамических давлений, не превышающие 0,2—0,3 МПа, не позволяют существенно расширить область применения виброреагентной обработки в сравнении с циклической. Но степень удаления кольматанта из прифильтровой зоны скважины при виброреагентной обработке возрастает и возможно достижение практически первоначального удельного дебита скважины в случае, если длительность ее эксплуатации до обработки не превышает 3—5 лет. В длительно работавших водозаборных скважинах более предпочтительно сочетание интенсивной импульсной и реагентной обработки.

Опыт применения совместного взрыва ТДШ с циклической реагентной обработкой на скважинах в зоне Куйбышевского водохранилища, Каховского водохранилища и Киевского водозабора г. Курска показал, что удельный дебит в среднем увеличивался в 3 раза, на скважинах в районе Куйбышевского водохранилища, эксплуатировавшихся до обработки 14—19 лет, в 7,6 раза. Удельный дебит был восстановлен в среднем до 60 % первоначального.

Пневмоимпульсная обработка скважин с последующей циклической реагентной обработкой проводилась на скважинах сельскохозяйственного водоснабжения Тамбовской обл. и на Киевском водозаборе г. Курска. Для производства работ применялся пневмоимпульсный агрегат АСП-Т. В Тамбовской обл. скважины обрабатывались пневмоимпульсами в пределах рабочей части фильтров снизу вверх. Число рейсов пневмокамеры от 4 до 6, количество пневмоимпульсов 361—437 при давлении в воздухосборнике от 12 до 2,2 МПа.

Далее скважины обрабатывались раствором соляной кислоты со стабилизирующими добавками фосфатов. Возвратно-поступательное движение раствора в закольматированной прифильтровой зоне скважины обеспечивалось периодическим его задавливанием за контур фильтра давлением сжатого воздуха, подаваемого от компрессора бурового агрегата, с последующим сбросом давления. Результаты этих комбинированных обработок приведены в табл. 18.4.

В результате комбинированной обработки удельный дебит увеличился в 2—6,6 раза при существенном снижении показателя обобщенного сопротивления. При этом удельный дебит скважин был восстановлен практически до первоначальных значений, причем 59,8 % общего приращения удельного дебита приходится на пневмоимпульсную обработку, 40,2 % — на реагентную обработку.

Скважины Киевского водозабора в виде линейного ряда каптируют водоносный комплекс, приуроченный к четвертичным и сеноман-альбским пескам со средней величиной водопроводимости около 350 м²/сут. Скважины глубиной 35—37 м оборудованы гра-

Таблица 18.4. Эффективность обработок скважин Тамбовской обл. пневмоимпульсным способом с последующей циклической реагентной обработкой

Номер скважины	Первоначальный удельный дебит, м³/(ч·м)	Пневмоимпульсная обработка		Увеличение удельного дебита, раз	Реагентная обработка		Общее увеличение удельного дебита, раз	Восстановление удельного дебита относительно первоначального, %
		до обработки	после обработки		удельный дебит после обработки, м³/(ч·м)	увеличение удельного дебита, раз		
4690	1	0,14	0,62	4,4	0,92	1,5	6,6	92
43134	1	0,23	0,66	2,87	0,95	1,44	4,1	95
1684	2	0,9	1,58	1,76	2,04	1,29	2,27	102
2847	1,8	1,03	1,64	1,6	2,07	1,26	2	115

вийно-проволочными фильтрами диаметром 245—299 мм. Здесь циклическая реагентная обработка производилась после пневмоимпульсной обработки герметизированного фильтра. Обработку производили раствором дитионита натрия. Для производства работ применялся также пневмоимпульсный агрегат АСП-Т. После закачки раствора в фильтр скважины производили пневмоимпульсную обработку, в ходе которой пневмоснаряд перемещался через 10 см после каждого выхлопа в пределах рабочей части фильтра от его верхнего до нижнего конца и наоборот (2—4 раза). Давление в воздухосборнике в ходе обработки изменялось от 11 до 2,6 МПа. Давление воздуха под пакером находилось в пределах 0,04—0,13 МПа. Далее производили циклическую реагентную обработку. При этом в каждом цикле возвратно-поступательное движение раствора в закольматированной зоне обеспечивалось давлением сжатого воздуха от компрессора в пределах 0,04—0,12 МПа в течение 5—10 мин с последующим сбросом давления до атмосферного.

В результате проведенных обработок удельный дебит скважин увеличился в 1,7—4,8 раза и в среднем составил около 70 % первоначального (табл. 18.5).

После проведенных обработок на Киевском водозаборе г. Курска было прослежено изменение удельных дебитов скважин во времени (рис. 18.3). Через год после обработки удельный дебит в среднем по скважинам составил 93,5 % достигнутого в результате обработки. Необходимо отметить, что при этом удельные дебиты скважин очень близки. Через два года после обработки закономерности изменения удельных дебитов меняются. Можно выделить две группы скважин с разным темпом снижения удельных дебитов. Удельный дебит скважин первой группы в среднем составляет 84,8 % достигнутого в результате обработки, второй группы — 57,1 %. При этом лишь в двух скважинах второй группы удельные дебиты стали немного ниже удельных дебитов, зафиксированных до обработки.

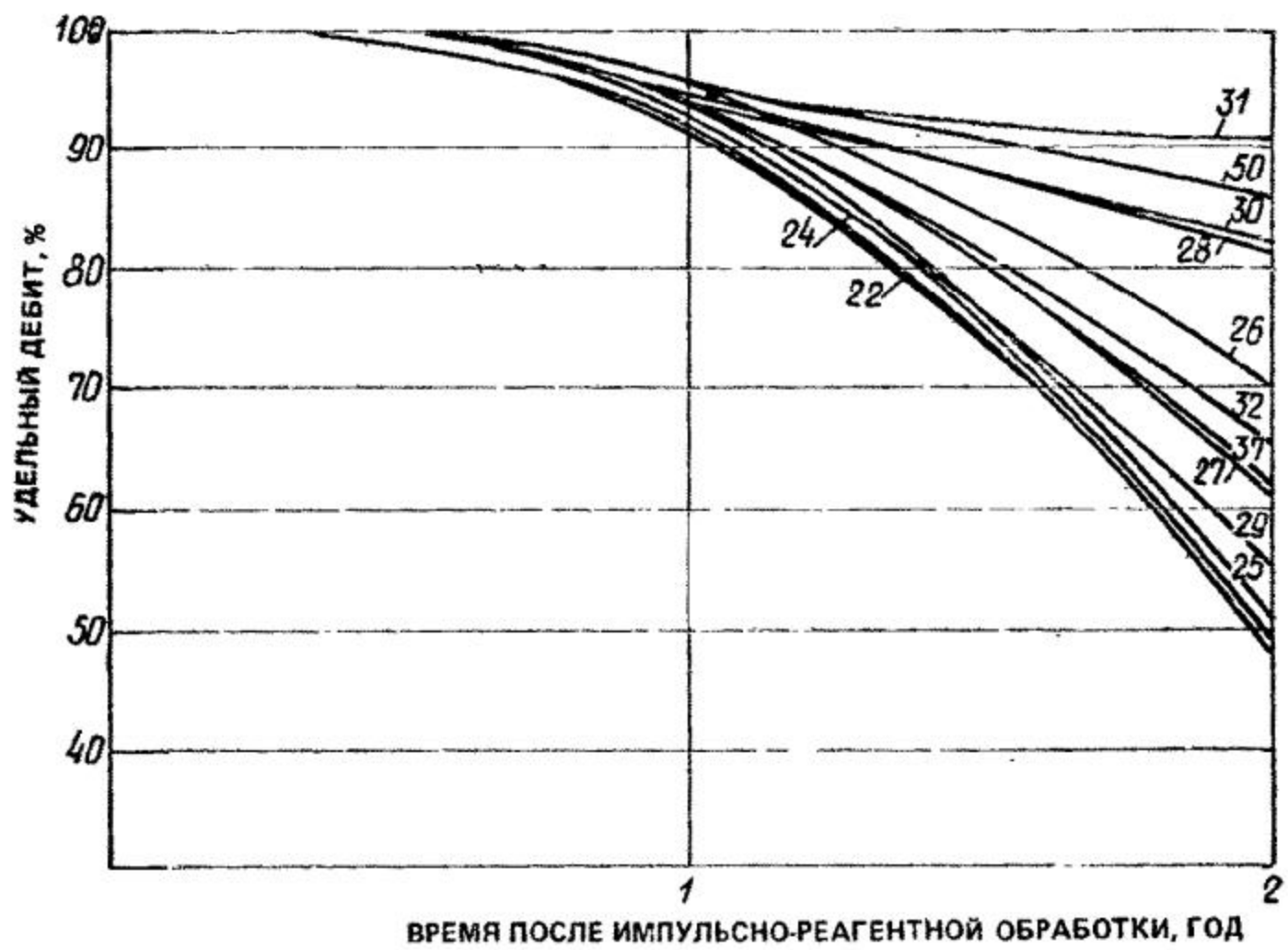


Рис. 18.3. Снижение удельных дебитов скважин после импульсно-реагентной обработки (цифры — номера скважин)

Таблица 18.5. Эффективность циклических обработок скважин Киевского водозабора г. Курска с предварительной пневмоимпульсной обработкой в герметизированном фильтре

Номер скважины	Число лет эксплуатации	Удельный дебит, м³/(ч·м)			Увеличение удельного дебита, раз	Показатель обобщенного сопротивления		Восстановление удельного дебита относительно первоначального, %
		первоначальный	перед обработкой	после обработки		до обработки	после обработки	
13	9	3,7	1,2	3,5	2,9	—	—	94,6
21	8	7,1	1,8	4,9	2,7	—	—	68,5
22	8	10	1,8	3,5	1,9	14,7	9,8	34,8
23	8	10,8	3,1	3,6	2,1	9,1	5,6	61
24	3	10	4,8	9,4	2	—	—	93,6
25	8	15	5,3	10,8	2	—	—	72
26	8	11,2	4	8,1	2	11,2	6,7	72,3
27	8	13,4	2,8	13,4	4,8	14	10,6	100
28	8	11	3,1	8,6	2,8	—	—	76,5
29	8	13	3,4	10,8	3,2	—	—	82,7
30	8	12	1,7	4,5	2,6	30,7	13,5	37,5
31	7	15	1,6	4,1	2,6	28,1	18,5	27,6
32	8	12	2,8	9,54	3,4	—	—	79,5
37	4	7	2,7	4,5	1,7	23,3	16,4	64,2
48	7	17	7,6	1,7	2,2	9,4	2,7	100
50	7	13,7	2,8	7,2	2,6	21,2	7,3	52,5

Циклическая реагентная обработка с предварительной пневмоимпульсной обработкой скважин, оборудованных гравийно-проволочными фильтрами, позволила после 3—9 лет эксплуатации сква-

жин увеличить их удельный дебит в среднем на 70% относительно первоначального.

При пневмореагентной обработке скважин без герметизации сетчатых фильтров при различных сроках эксплуатации скважин (от 2 до 14 лет) достигается увеличение удельного дебита в среднем до 67,1 % относительно первоначального. Время стабильной работы скважин после импульсно-реагентных обработок составляет не менее 10 мес, и межремонтный период скважин при подобного рода их обработках может быть принят в пределах 2--3 лет.

Близкий эффект достигается при совместном проведении ЭГУ и реагентной обработки, но при этом требуется применение специального типа разрядника, обеспечивающего изоляцию разрядного устройства от электролита (реагента).

Термореагентная обработка предпочтительна в длительно эксплуатировавшихся скважинах. Наиболее эффективен подогрев соляной кислоты, который осуществляют за счет применения экзотермических реагентов, вводимых в соляную кислоту (безводный хлористый алюминий, магний), специальных термоснарядов или ТЭНов.

Таблица 18.6. Эффективность термореагентных обработок скважин водозабора Балтэзерс

Номер скважины	Число лет эксплуатации	Характеристика реагента				Удельный дебит, м³/(ч·м)			Достигнутый удельный дебит относительно первоначального, %
		Объем раствора, л	Концентрация реагентов, %			первоначальный	до обработки	после обработки	
			HCl	$Na_5P_3O_{10}$	$AlCl_3$				
80	15	600	27,5	0,03	7,8	10,8	6,6	11,4	105,3
81	15	600	27,5	0,03	7,9	10,8	5,4	10,5	96,6
144а	10	460	27,5	0,01	11,7	26,6	7,9	17,4	65,2
152	13	560	27,5	0,01	8,4	24,8	15,4	24,6	101,7
151	13	700	27,5	0,01	13,5	22,7	4,1	14,4	63,8
158	13	600	27,5	0,02	8,2	23,4	13,9	20,9	89,2
159	13	600	27,5	0,02	8,8	28,1	16,3	27,1	96,4
156	14	700	27,5	0,04	7,5	25,9	21,8	45,8	177,7
163	14	700	27,5	0,04	4,0	54,7	18,5	27,8	49,8
167	14	700	27,5	0,04	3,8	29,5	10,7	13,9	47,9

На водозаборе Балтэзерс г. Риги термореагентные обработки проводились на скважинах, оборудованных керамическими фильтрами (табл. 18.6). После заливки в герметизированную скважину соляной кислоты со стабилизирующими добавками фосфатов в область фильтра установили термоснаряд, заполненный хлористым алюминием безводным. Обработка проходила циклически за счет энергии образовавшихся газов в пределах 0,08—0,15 МПа.

Сравнительно незначительное увеличение удельных дебитов скважин № 163, 167 относительно первоначального (49,8 и 47,9 %)

может быть объяснено недостаточным количеством введенного безводного хлористого алюминия (4,0 и 3,8 %). В остальных случаях удельный дебит скважин был увеличен в среднем до значений, близких к первоначальным (99,4 %).

При обработке скважин в зоне Краснодарского водохранилища в качестве термореагента использовали также безводный хлористый алюминий и магний. Обработка производилась без задавливания раствора за контур фильтра сжатым воздухом, так как уровень грунтовых вод располагался у верхней части фильтра. В процессе термокислотных обработок в фильтре скважин производилось измерение температуры кислоты при помощи термисторов КМТ-4, установленных в верхней и средней части фильтра. Установлено, что происходил подъем температуры до 56—75° С. Степень восстановления производительности скважин оценивалась путем сопоставления достигнутого приращения дебита при самоизливе относительно дебита до обработки (табл. 18.7).

Таблица 18.7. Эффективность термореагентных обработок дренажных скважин Краснодарского водохранилища

Номер скважины	Реагенты			Показатель обобщенного сопротивления скважин		Дебит скважины, $м^3/ч$		Относительное приращение дебита, %
	25% HCl, л	$Na_5P_3O_{10}$, кг	термореагент, кг	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки	
87	600	1	$AlCl_3$ — 50	9,9	7,8	3,6	9	150
88	500	1,5	$AlCl_3$ — 78	7,3	5,6	0,92	4,8	421,7
89	500	1	$AlCl_3$ — 60	5,1	4,1	1,23	5,14	317,9
187	900	—	Mg — 40	—	—	0,76	2,41	217,1

Как видно из полученных данных, применение термоснаряда позволило получить ощутимый эффект при термореагентных обработках: приращение по дебиту скважин относительно дебита до обработки находится в пределах 150—421,7 %.

Для оценки эффективности применения термоснаряда были проведены термокислотные обработки самоизливающихся скважин, в ходе которых в фильтры подавали по 300 л ингибированной соляной кислоты 25%-ной концентрации со стабилизирующими добавками и по 45 кг гранулированного магния на забой. При этом температура нагрева кислоты не превышала в среднем 40° С. После достижения максимальной температуры задавливание нагретой кислоты в закольматированную прифильтровую зону производили водой (1,5—2 $м^3$) и в таком положении скважина оставалась 18—20 ч, после чего производили эрлифтную прокачку.

При всех термокислотных обработках наблюдался газлифтный подъем жидкости по гравийной обсыпке и стволу скважины. В результате термокислотных обработок десяти скважин с засыпкой магния на забой дебит скважин был увеличен в среднем с 3,14

до 6,59 м³/ч. Сравнительные данные эффективности различных методов обработки самоизливающихся скважин Краснодарского водохранилища приведены в табл. 18.8.

Таблица 18.8. Эффективность различных реагентных методов обработки самоизливающихся скважин Краснодарского водохранилища

Способ обработки	Число скважин	Среднее приращение дебита относительно дебита до обработки, %
Термокислотная обработка при помощи термоснаряда	4	276,7
Термокислотная обработка с засыпкой магния на забой	10	109,8
Кислотная ванна с задавливанием кислоты водой	137	100,8

Термокислотная обработка при помощи термоснаряда обеспечивает увеличение производительности скважин более чем в два раза по сравнению с другими используемыми реагентными методами, что свидетельствует о большей возможности извлечения кольматанта из прифильтровой зоны.

18.2. Методы восстановления производительности лучевых водозаборов

Снижение производительности лучевых водозаборов, сооружаемых в береговой зоне рек с подрусловыми лучами-дренами, вызывается кольматацией русловых отложений и водоприемной поверхности дрен. Закономерности изменения удельного дебита лучевых водозаборов аналогичны скважинам и в большинстве случаев описываются зависимостью, близкой к экспоненциальной (рис. 18.4). В обобщенном виде они описываются зависимостью вида $q=e^{-0,0102t+3,28}$, что соответствует уменьшению удельного дебита за 42 мес. в 2,5 раза. Более интенсивное снижение удельного дебита лучевого водозабора было зафиксировано в Кутюре (Франция, Парижский бассейн), где лучевые водозаборы каптировали водоносный горизонт в аллювиальных отложениях р. Луары. Здесь удельный дебит снижался в 2 раза уже через 1—1,5 ч эксплуатации. Одной из основных причин интенсивного кольматажа в этом случае явилась биологическая деятельность железобактерий.

При восстановлении производительности дрен используют механическую чистку ершом, промывку их с применением гидронасадок и реагентную обработку путем задавливания реагента за контур фильтра. В Кутюре при регенерации лучевых водозаборов был использован обширный комплекс методов: механическая очистка с последующей обработкой полифосфатами, соляно-кислотная обработка, регенерация смесью органических и минеральных

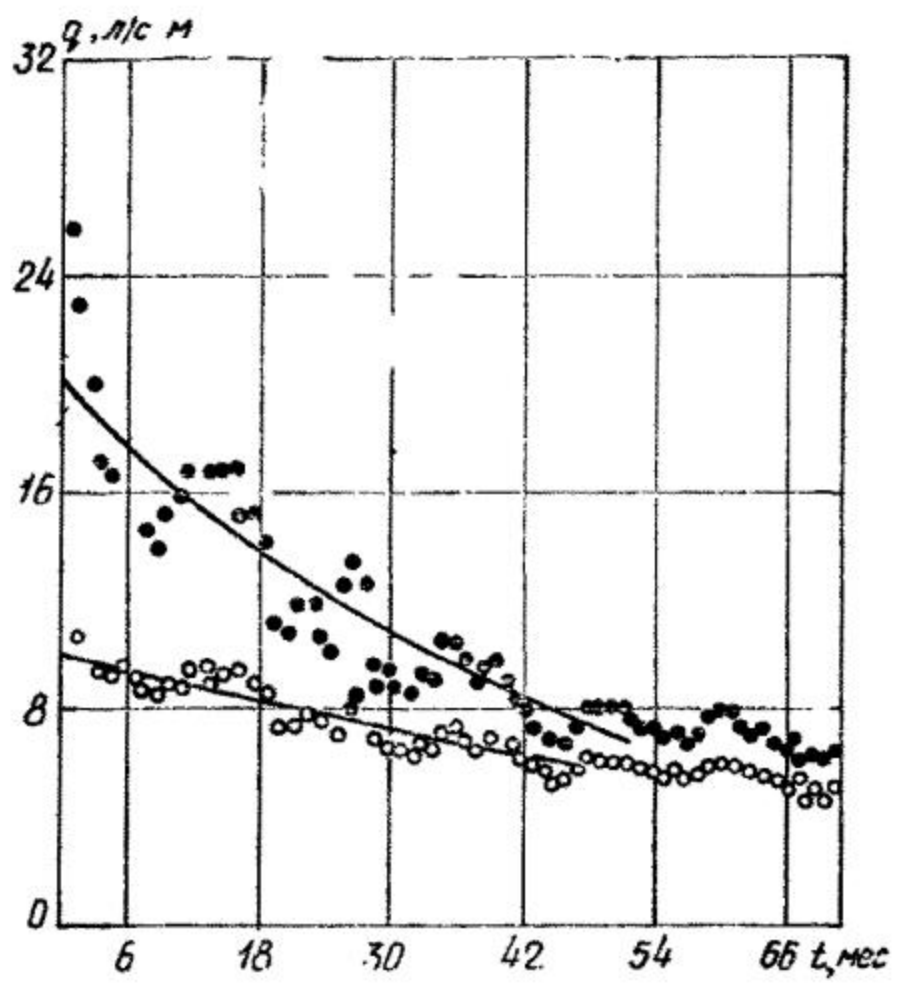


Рис. 18.4. Снижение удельного дебита лучевого водозабора в г. Белграде (Югославия) во времени

кислот, эрлифтная прокачка дрен, хлорирование для подавления биологической деятельности железобактерий и, наконец, добуривание новых лучей с оборудованием их пластмассовыми фильтрами и трубами. Ни один из перечисленных способов регенерации не обеспечил восстановления первоначальной удельной производительности водозабора. После обработки она не превысила 70—80% первоначальной. Вероятно, это связано со значительной сложностью равномерного задавливания реагента в лучи-дрены, особенно при затопленных водовыпусках дрен.

В равной степени затруднительна и очистка закольматированного слоя русловых отложений, проницаемость которых уменьшается при интенсивном водозаборе. Для этой цели применяют очистку русла реки с использованием земснарядов, специальные водоструйные приспособления и рыхлители дна.

Интересный опыт эксплуатации подруслового водозабора лучевого типа системы водоснабжения г. Варшавы, сооруженного под руслом р. Вислы, проанализирован А. Грунвальдом. Водозабор состоит из трех шахтных водосборных колодцев. В ходе этапного строительства на первой очереди был построен водозабор с проектной производительностью 150 000 м³/сут. К сборному колодцу были подсоединены 15 лучевых дрен диаметром 300 мм с длиной каждого луча около 100 м. Все лучи ориентированы под русло реки, а заглубление их составляет 6—7 м. При расширении водозабора было запроектировано и построено еще два колодца с восемью лучевыми двухъярусными дренами. Проектная производительность каждого из них 50 000 м³/сут.

При эксплуатации первого водозабора наблюдалось постепенное снижение его дебита. Несмотря на то что применение чистки русла земснарядами с помощью механических устройств, отключение водозабора приводило к увеличению количества отбираемой

воды, этот эффект был кратковременным, а прочистка русловых отложений компрессором дала отрицательные результаты. За 10 лет производительность водозабора снизилась с 150 000 до 100 000 м³/сут, а в отдельные периоды была значительно ниже. Для восстановления производительности водозабора было использовано гидравлическое промывочное устройство, смонтированное на понтоне. Оно включает насосные агрегаты производительностью 180 л/с и давлением 0,1 МПа с рабочим наконечником из двух труб диаметром по 100 мм, укрепленных на подвижной раме, передвигающейся в вертикальной плоскости. На конце каждой трубы устроены сопла, направленные вверх под углом 45°, а также размывающие сопла (гидронасадки), направленные вниз, для размыва донных отложений.

Процесс декольматации русловых отложений сводится к перемещению насадков, которые обеспечивают промывку пласта над дренами, и горизонтальному удалению илистых образований вниз по течению реки. Скорость движения воды в реке при этом способе декольматации должна быть не менее 0,3 м/с. В результате такой декольматации на Пражском водозаборе г. Варшавы удельный дебит был увеличен с 12—30 л/с до 32—35 л/с, а производительность достигла первоначальной — 150 000 м³/сут. Новая установка для декольматации русловых отложений Пражского водозабора оборудована центробежным насосом производительностью 100 л/с с давлением 0,5 МПа. Таким образом, для регенерации лучевых водозаборов разработан ряд приспособлений и устройств, однако производство работ оказывается более трудоемким, чем восстановление производительности вертикальных скважин.

18.3. Методы восстановления производительности шахтных колодцев

При химическом и биологическом кольматаже водоприемной части шахтных колодцев применяют реагентные и комбинированные методы регенерации. Вместе с тем опыт показывает, что в большинстве случаев устойчивая работа шахтных колодцев обеспечивается нх механической или гидравлической чисткой. Для этой цели разработан ряд установок. Одним из вариантов такой установки является машина КазНИИМЭСХ (ОШК-3) с рабочим органом в виде бадьи, получающей колебания от жестко закрепленного электрического вибратора. Машина ОШК-3 особенно эффективна в том случае, когда в колодцах мало воды.

Гидравлический принцип чистки колодцев реализован в гидроциклонной насосной установке ГЦУ с телескопическим подъемно-спускным механизмом на базе автомашины ЗИЛ-131. Установка разработана КазНИИВХ и состоит из многоступенчатого насоса, гидроциклонной подъемной камеры и гидроэлеватора.

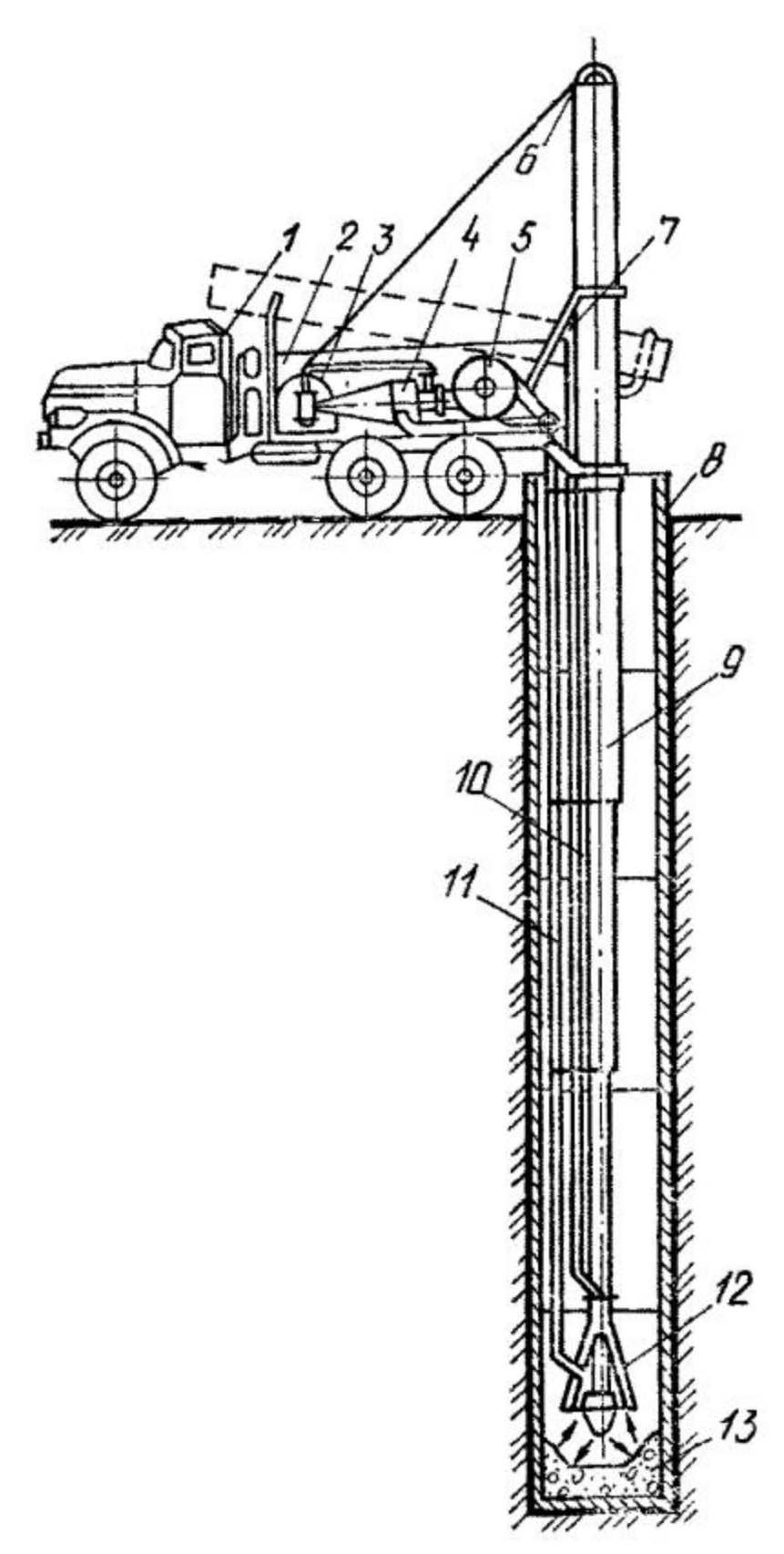


Рис. 18.5. Схема гидроциклонной насосной установки ГЦУ для чистки колодцев конструкции КазНИИВХ

1 — автомашина ЗИЛ-131; *2* — лебедка подъема вышки; *3* — гидроциклон-сгуститель; *4* — гидроциклонная насосная установка; *5* — подъемно-спускной механизм установки; *6* — блок; *7* — стойка; *8* — шахтный колодец; *9* — телескопическая часть; *10* — всасывающая линия; *11* — напорная линия; *12* — гидроэлеватор с гидроциклонным насадком; *13* — пульпа

Установка работает следующим образом (рис. 18.5). При помощи телескопического устройства *9* опускают гидроэлеватор *12* до дна шахтного колодца *8*. Установку заполняют водой и пускают ее в работу. Рабочая жидкость, попав по напорной трубе *11* в гидроэлеватор, попутно засасывает из колодца донные наносы *13* и подает их по трубе *10* в приемную камеру гидроциклонного насоса *4*. В камере гидроциклона происходит отделение осадка от осветленной жидкости. Осветленная жидкость насосом подается обратно в гидроэлеватор, а осадок транспортируется в гидроциклон-сгуститель *3*, где под действием давления струйного аппарата происходит его уплотнение. Таким образом, в машине создается замкнутая гидравлическая система, требующая небольшого количества жидкости для размыва и удаления донных отложений из шахтного колодца.

ГЛАВА 19. НАБЛЮДЕНИЯ НА ВОДОЗАБОРАХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

19.1. Основные задачи и состав наблюдений

Вопросы изучения эксплуатации подземных вод, включая также водозаборы с оборудованием и подачей через распределительную сеть потребителю, а также состав наблюдений и их анализ, в литературе освещены очень мало.

В публикациях по гидрогеологии рассматриваются в основном вопросы наблюдений за подземными водами без исследований самих водозаборов и без комплексного анализа таких наблюдений.

Необходимо комплексное изучение подземных вод и водозаборов из них, включая вопросы эксплуатации оборудования водозаборов и насосных станций, резервуаров, водоводов, а также при необходимости изучение гидрологических и метеорологических показателей. Кроме того, должны проводиться санитарные наблюдения (см. гл. 16).

Следует отметить, что гидрогеологические условия и системы водозабора подземных вод с их оборудованием весьма разнообразны. Главной задачей изучения эксплуатации водозаборов подземных вод является выявление изменения основных показателей и в особенности изменение уровней воды, снижение производительности, ухудшение качества воды, а также повышение ее стоимости.

Уменьшение производительности водозаборов может быть связано с понижением уровней подземных вод в районе водозаборов, с увеличением сопротивлений при входе воды из водоносного горизонта в водозаборы, износа насосов и другого технического оборудования, а также с изменением природных условий и условий формирования подземных вод. Ухудшение качества получаемой воды может происходить в силу разнообразных причин (см. разд. 15.4, гл. 15).

На повышение стоимости влияет, в частности, понижение уровня воды в скважинах (и в других водозаборах), а также ухудшение в связи с этим к. п. д. насосов, износ насосов и т. д. Последние причины влияют на снижение производительности водозабора, либо увеличение расхода электроэнергии, или происходит и то, и другое. Снижение уровней по гидрогеологическим условиям и под влиянием эксплуатации в артезианских водах достигает десятков и сотен метров; в грунтовых водах снижение уровней при эксплуатации значительно меньше — редко до 20 м. Таким образом, при эксплуатации подземных вод необходимо наблюдать и изучать уровни и качество подземных вод, а также работу водозаборов, их производительность и состояние.

Наблюдения за уровнями и качеством подземных вод с анализом изменения условий их формирования, а также с учетом анализа показателей эксплуатации водозаборов и санитарных усло-

вий позволяют сделать вывод о качестве работы этих водозаборов, стабильности или изменении производительности и качества воды, подаваемой водозабором, а также о его техническом состоянии.

19.2. Приборы для оснащения наблюдательных скважин

Приборы для определения уровней и температуры воды в наблюдательных скважинах применяют как стационарные с регистрацией показаний на месте и на расстоянии, так и переносные с разовым измерением.

Для измерения уровня воды в наблюдательных скважинах чаще применяют простые и дешевые переносные уровнемеры. Диапазон их измерений по глубине составляет 50—200 м и даже 500 м. Чаще применяют уровнемеры с хлопушкой диаметром 16—40 мм и с рулеткой (РС-20 и РС-40) для глубин измерения соответственно 20 и 40 м и с катушкой (ГГП-12б) при диаметре хлопушки 40 мм и глубине измерения до 100 м. Диапазон измерений стационарных электроуровнемеров составляет 50—500 м для различных типов и диаметров датчика (чаще 12 мм, для типа ЭВ-1М — 20 мм).

Стационарные уровнемеры характеризуются широким диапазоном характеристик. Различают следующие группы уровнемеров: 1) основная — по диапазону измерения колебаний уровня; 2) по расположению по отношению к уровню воды: ниже или на уровне; 3) по функциональному признаку: показывающие, регистрирующие и сигнализирующие; 4) измерения на объекте и дистанционные; 5) по способу измерения: поплавковые, гидростатические и электрические.

Уровнемеры с сигнализацией на расстоянии применяют в эксплуатационных скважинах. Температуру воды в наблюдательных скважинах определяют глубинными приборами, но для получения действительной температуры подземных вод необходимо выполнить предварительную прокачку с расходом не менее трех объемов воды в скважине. Такие определения температуры производят периодически, в частности, при помощи так называемых ленивых ртутных термометров.

Если полученные глубинным термометром значения температуры после откачки и без прокачки одинаковы, то в дальнейшем можно от прокачки при замерах температуры в наблюдательных скважинах отказаться. Однако достаточность прокачки скважины при трех объемах воды, указанных выше, должна проверяться путем увеличения продолжительности этой прокачки с соответствующими замерами температуры глубинным термометром и в откачиваемой воде на поверхности (у излива).

Пробы воды для анализа отбирают из наблюдательных скважин после достаточной прокачки ее на поверхности или при помощи опускаемого в скважину пробоотборника.

Анализы воды выполняют в лаборатории, но некоторые показатели ее качества определяют автоматическими приборами и, в частности, определения pH, температуры, цветности, содержания кислорода, БПК. Автоматическое определение кислорода, например, производится анализатором АКВА-С, который состоит из измерительного устройства (датчика), самопишущего миллиамперметра КСУ2-003 и других деталей. Этот анализатор особенно важен в системе ИВПВ I типа с инфильтрационными бассейнами. При поступлении воды в бассейн следует увеличивать содержание кислорода в воде, который расходуется на улучшение ее качества в бассейне, илистой пленке, зоне аэрации и водоносном горизонте по пути движения к водозаборам. Поэтому изменение содержания кислорода нужно определять на этих четырех участках. Содержание кислорода, а также pH определяют на месте, так как со временем содержание растворенных газов в воде меняется.

19.3. Размещение наблюдательной сети. Сроки наблюдений

Разные гидрогеологические, гидрологические, технические и санитарные условия диктуют различное размещение наблюдательных пунктов, их число и сроки наблюдения при эксплуатации подземных вод. Наблюдения за подземными водами при их эксплуатации особенно важны в зоне строгого санитарного режима (1-й пояс), которая включает участок водозаборов со всеми сооружениями и оборудованием. Затем нужны наблюдения и изучение подземных вод во втором и третьем поясах санитарной охраны, которые для грунтовых вод обычно совпадают с областью формирования эксплуатационных запасов; во втором и третьем поясах на расчетный срок эксплуатации возможно изменение формирования подземных вод — положение их уровней, качества воды и ее расхода. Когда формирование эксплуатационных запасов подземных вод связано с поверхностными водами рек, озер, водохранилищ, а также с разными гидротехническими и мелиоративными мероприятиями (осушение, орошение), а также горными разработками полезных ископаемых, размещение наблюдательной сети включается в проект зоны санитарной охраны.

Многообразие гидрогеологических и других условий, а также типов и схем водозаборов подземных вод с их оборудованием осложняет конкретные указания по размещению для всех возможных случаев наблюдательных пунктов за режимом подземных вод. Однако принципиальные требования к наблюдениям за подземными водами при эксплуатации можно сформулировать и рекомендовать, учитывая при этом имеющийся опыт по изменению уровней, расхода и качества подземных вод. Следует при этом учитывать, что изменения производительности и качества воды, получаемой водозаборами, может зависеть от изменений, происходящих в самих водозаборах. Один из таких примеров ухудшения

качества воды отмечен в разд. 15.4 гл. 15. Поэтому в наблюдениях, а затем и в их анализе следует учесть состояние водозаборов подземных вод с их оборудованием.

Таким образом, следует производить наблюдения за уровнями и качеством подземных и поверхностных вод, а также за расходом воды и ее качеством из водозаборов, техническим состоянием последних, включая оборудование. Разумеется, наблюдения за подземными водами и водозаборами должны учитывать данные по санитарному состоянию. Последнее обусловливает более детальные наблюдения в зоне строгого режима (I) и менее детальные — во II и III зонах ограничений. В зависимости от гидрогеологических условий обычно выбирают и тип водозабора; гидрогеологические условия также влияют на перечень необходимых санитарных мероприятий. В связи с этим, например, можно выделить следующие гидрогеологические условия:

1. Напорные воды и, в частности, артезианские, а также в погребенных долинах рек, хорошо защищенных от загрязнения.

2. Безнапорные воды, не защищенные сверху от загрязнения (вдали от поверхностных вод).

3. Безнапорные воды с близкими участками питания из поверхностных вод, из участков орошения, а также связанные с участками осушения.

4. Береговые инфильтрационные водозаборы.

5. Системы ИВПВ.

6. Подземные воды в особых условиях (многолетняя мерзлота, возможность засоления и др.).

Наблюдения за техническим состоянием водозаборов, связанных с ними других сооружений и оборудования, необходимы во всех случаях.

Из приведенной выше схемы различных гидрогеологических условий можно отметить следующие наиболее важные объекты наблюдения.

1. При эксплуатации артезианских и вообще напорных вод, хорошо защищенных от загрязнения и вдали от областей питания:

а) понижение уровней воды при эксплуатации, в особенности в эксплуатационных скважинах;

б) выявление связи с другими водоносными горизонтами, а при развитии эксплуатации даже возможность подпитывания из поверхностных вод (например, при эксплуатации соломанского водоносного горизонта в Киеве питание за счет вод Днепра и в связи с этим изменение эксплуатационных запасов подземных вод).

2. При эксплуатации безнапорных вод, не защищенных от загрязнения и питающихся за счет атмосферных вод:

а) выявление недопустимого понижения уровня воды при эксплуатационном отборе, превышающем эксплуатационные запасы и технические возможности;

б) санитарные охранные мероприятия подземных вод.

3. При эксплуатации подземных вод, имеющих близкую связь с поверхностными водами, с участками орошения или осушения:

а) влияние поверхностных вод, а также участков орошения и осушения на уровни подземных вод, их качество и производительность водозаборов;

б) санитарные охранные мероприятия по подземным и поверхностным водам.

4. При береговых инфильтрационных водозаборах и ИВПВ:

а) режим поверхностных вод(уровни, расходы, качество воды с учетом микроорганизмов), заиление дна реки, водохранилища на участке питания подземных вод;

б) изменение качества воды, получаемой из водозаборов;

в) изменение уровней в подземных водах и водозаборах из них, а также производительности последних;

г) санитарные охранные мероприятия по подземным и поверхностным водам.

5. При подземных водах в особых условиях дополнительно следует изучать влияние этих условий, например:

а) в районах многолетней мерзлоты вопросы замерзания и оттаивания грунтовых надмерзлотных, межмерзлотных и даже подмерзлотных вод при эксплуатации, а также водозаборов и трубопроводов. (Такое же замечание относится к системам ИВПВ и подземным водохранилищам. В связи с этим особенно важно изучение температуры подземных и поверхностных вод, а также качества последних и, в частности, по мутности);

б) в линзах пресных вод, плавающих на соленых, важно изучение качества воды и особенности его изменения по глубине в зоне контакта пресных и соленых вод;

в) в других особых условиях (повышенная сейсмичность, просадочные грунты и др.) должны учитываться наблюдения за их влиянием на подземные воды.

Сроки отбора проб воды на анализ принимаются в зависимости от гидрологических и гидрогеологических и особенно санитарных условий. Например, отбор воды из водозабора поверхностных вод: полные анализы — 1—3 раза в год и в паводок, сокращенные анализы — 3—5 раз в месяц, анализы мутности — каждый день. После предварительной очистки — как для водозабора поверхностных вод. Из инфильтрационных бассейнов: по специальной программе — химический и микробиологический анализ для выяснения условий в инфильтрационном бассейне и улучшения качества воды после прохождения пленки и зоны аэрации.

Гидрометрические наблюдения по реке лучше получать от Гидрометслужбы. Самостоятельные гидрометрические наблюдения на реке следующие: а) за уровнем воды ежедневно; б) за расходом воды в реке 1—3 раза в месяц, в паводки и самую низкую межень. После выявления связи расходов воды реки и уровней сроки замеров расходов сокращаются. В реке и в инфильтрационном бассейне зимой ведутся наблюдения за толщиной льда, а

в реке — еще за образованием донного льда. По мере надобности ведутся наблюдения по заилению дна реки и увеличению фильтрационных сопротивлений.

19.4. Обработка наблюдений за подземными водами и водозаборами при эксплуатации

При обработке наблюдений за режимом подземных вод при эксплуатации водозаборов в первую очередь систематизируют полученные данные в виде таблиц с указанием дат. Затем проверяют соответствие проектных данных фактическим наблюдениям по производительности эксплуатационных скважин, водозабора в целом, уровням воды в эксплуатационных и наблюдательных скважинах, а также качеству подземных вод на основании данных анализов проб. Если вместо скважин эксплуатируется другой тип водозабора, то сопоставляют результаты наблюдений с проектными данными. Во всех случаях, когда прослеживается заметная связь подземных вод с поверхностными, анализируют закономерности изменения производительности отдельных элементов водозабора, уровней воды в наблюдательных и эксплуатационных скважинах, а также качества воды, получаемой водозабором, при необходимости с изменениями в поверхностных водах. Анализ такой связи производится статистическими и аналитическими методами.

Водозаборы из скважин при неглубоком снижении уровня (не более 6—8 м от поверхности земли) оборудуются сифоном (г. Рига, система ИВПВ) с общим всасывающим трубопроводом. Но это редко применяется, так как понижение уровня в скважинах даже на 1—3 м при указанных схемах может вызвать снижение производительности, а иногда и прекращение подачи воды. В таких водозаборах особенно недопустимо снижение уровня в скважинах против принятого в проекте.

Необходимо выполнить анализ с целью уточнения параметров водоносного горизонта для расчета водозаборов подземных вод и прогноза дальнейшей эксплуатации: производительности, качества воды, положения уровней. Для ИВПВ, например, I типа особенно важен прогноз работы инфильтрационных бассейнов по производительности и улучшения качества воды, а также возможных изменений водохозяйственных условий.

Рассмотрим для примера анализ некоторых изменений расчетных параметров работы водозаборов (дебиты, уровни, качество воды). Имея данные о работе водозабора и уровнях, можно решать так называемую обратную задачу для определения коэффициента фильтрации, уровнепроводности и пьезопроводности.

Следует иметь в виду, что подход к анализу наблюдений за подземными водами и водозаборами зависит от гидрогеологических, гидрологических, технических и санитарных условий, изменений, выявленных и прогнозируемых. Он будет отличаться при

проведении наблюдений за водозаборами эксплуатируемого артезианского водоносного горизонта в реках вдали от области питания, за береговым инфильтрационным водозабором. Могут также возникнуть дополнительные обстоятельства. Например, вода в водозаборе с отмеченным участком артезианского горизонта может иметь повышенное содержание железа, которое при эксплуатации будет выпадать на фильтрах скважин, увеличивая сопротивления при входе воды в скважину. В итоге при сохранении дебита будет наблюдаться понижение динамического уровня в скважине или при сохранении динамического уровня будет происходить уменьшение дебита скважины. Дополнительным обстоятельством может являться перетекание воды из других водоносных горизонтов в эксплуатационный артезианский, что задержит распространение депрессионной воронки и понижение уровня воды. При эксплуатации берегового водозабора может наблюдаться заиление русла реки, в связи с чем возникает дополнительное сопротивление движению воды и понижение уровня ее в скважинах водозабора.

При анализе изменения расхода источника очень важно учитывать условия питания водоносного горизонта. Для ИВПВ анализ их режима зависит от типа ИВПВ (см. гл. 13), а также от ряда дополнительных условий и, в частности, гидрогеологических и климатических. Например, для ИВПВ I типа наиболее определяющим фактором является работа инфильтрационного бассейна. который питается обычно поверхностной водой и одновременно ее очищает. Очистка воды — сложный фильтрационный процесс, включающий механическое задержание взвешенных веществ, а также химические, физико-химические и биологические процессы в меняющихся условиях в течение фильтроцикла.

ГЛАВА 20. РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ В СИСТЕМАХ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

20.1. Теоретические и практические основы рационализации систем водозаборов подземных вод

Рационализация водозаборов подземных вод может включать принципиально новые решения, а также разработку и предложения по деталям. Она должна сопровождаться снижением стоимости воды(с учетом капиталовложений) без ухудшения качества, надежностью работы водозаборов, а в ряде случаев увеличением их производительности. Специфика водозаборов подземных вод состоит в том, что их проектируют, строят и эксплуатируют на основании результатов гидрогеологических изысканий и оценки эксплуатационных запасов, а для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения необходимо еще проведение исследований при

проектировании и организации зон санитарной охраны с соответствующим эксплуатационным надзором.

Детальная гидрогеологическая разведка и оценка эксплуатационных запасов подземных вод приурочены к их месторождениям и практически к участкам, на которых проектируются водозаборы. Таким образом, участок, на котором проектируется водозабор подземных вод, определяется разнообразными гидрогеологическими условиями, а для хозяйственно-питьевого водоснабжения еще и санитарными условиями. Кроме того, проектирование водозабора подземных вод и, в частности, его расположение, а также отдаленность от потребителя, связаны с экономическими требованиями. Выбор участка и условия эксплуатации подземных вод нередко взаимосвязаны с другими водохозяйственными мероприятиями района. Для того чтобы правильно решать вопрос об устройстве и эксплуатации водозабора подземных вод, проектировщикам необходимо знать результаты гидрогеологических изысканий, особенности гидрогеологических, санитарных и экономических показателей участка намечаемого водозабора для детальной разведки.

Из изложенного видно, что рационализация при проектировании, строительстве и эксплуатации (на основании стационарных наблюдений) водозаборов подземных вод может предлагаться также гидрогеологами, проводящими изыскания и оценку эксплуатационных запасов подземных вод, а также санитарной инспекцией. Проектировщики водозаборов подземных вод должны быть в курсе проводимых изысканий и, в частности, выбора водоносных горизонтов, месторождения для детальных изысканий, а также оценки эксплуатационных запасов. Основными рационализаторами водозаборов подземных вод должны быть проектировщики и эксплуатационники.

Рационализация систем водозаборов подземных вод основывается на теоретических изысканиях и практических знаниях комплекса водозаборов подземных вод. В ряде случаев рационализация определяется экономическими условиями, а также характеристиками комплекса водопровода в целом. Гидрогеологические условия весьма разнообразны, а при эксплуатации, кроме того, нужно уметь оценить возможность их изменений. При использовании подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения они должны по качеству соответствовать, как правило, ГОСТ 2874—82, т. е. быть пресными с лимитированным содержанием растворенных веществ. Для орошения и пастбищного водоснабжения требования к качеству воды приведены в табл. 1.1.

Пресные и слабоминерализованные подземные воды питаются за счет поверхностных вод, с которыми они часто (особенно грунтовые) близко связаны, а при эксплуатации питание неглубоких подземных вод за счет поверхностных обычно усиливается. Следовательно, при проектировании системы эксплуатации подземных вод следует учитывать как гидрологические, так и климатические

условия (в том числе метеорологические — осадки, температуру и пр.).

Водозаборы в ряде случаев представляют собой сооружения, оснащенные насосами, электромоторами, разными измерительными приборами, автоматикой, т. е. комплексом технического оборудования, использованием и проектированием которых необходимо хорошо владеть. Затем водозаборы включают зоны санитарной охраны. Кроме того, при рациональном проектировании водозаборов подземных вод нужно учитывать общий комплекс водохозяйственных мероприятий района, которые часто с указанными водозаборами взаимосвязаны. Без должного анализа взаимосвязи комплекса водохозяйственных мероприятий в ряде случаев могут возникнуть серьезные ухудшения качества подземных вод и параметров их эксплуатации.

20.2. Оценка условий рационализации по типам водозаборов подземных вод

Рационализация различных типов водозаборов подземных вод определяется их техническими особенностями, а также размещением оборудования и конструкцией отдельных элементов. Кроме того, существует зависимость от природных условий, в том числе от гидрогеологических и в соответствующих случаях гидрологических условий а также их изменение в процессе эксплуатации; сказывается влияние водохозяйственных мероприятий в районе. Принципиальные мероприятия для улучшения работы водозаборов, особенно при уменьшении производительности и ухудшении качества воды, общеизвестны, но их не всегда просто реализовать, исходя из природных условий, технических возможностей и экономических требований.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся системы водозаборов подземных вод из нескольких скважин. По водоподъемному оборудованию их можно разделить на две группы: первая — с погружными электронасосами и со сборным водоводом к регулирующему резервуару; вторая — с сифонным оборудованием и всасывающими насосами.

Примем следующие гидрогеологические и основные технические условия при размещении водозабора: а) эксплуатация глубоких артезианских вод из водоносного горизонта в песках вдали от области питания, хорошая защищенность от загрязнения, погружные электронасосы; б) береговой водозабор с погружными электронасосами в песчано-гравийных аллювиальных отложениях мощностью 20—30 м; в) сифонный водозабор с ИВПВ в песчаных отложениях мощностью 20—30 м на берегу озера.

В случае а) (особенно при наличии железистых подземных вод) чаще всего наблюдается заиление фильтра и прифильтровой зоны в зернистых породах (песках). Кроме того, в указанных артезианских водах при принятых условиях наблюдается непрерывное

снижение уровня и даже при периодических заменах погружных электронасосов снижается их к. п. д. При понижении уровня в эксплуатируемом водоносном горизонте может наблюдаться переток воды из других водоносных горизонтов и, в частности, при нарушенном стволе скважины. На этих часто встречающихся особенностях следует сосредоточить внимание, рационализируя водозаборы.

В случае б) важно запроектировать береговой водозабор так, чтобы при достаточном расходе реки и минимальном уровне воды в ней был обеспечен расход водозабора. Снижение эксплуатационной производительности водозабора наблюдается при заилении дна реки, увеличивающем сопротивление при движении речной воды к водозабору, снижающем уровни водоносного горизонта и скважин. При одновременном значительном притоке грунтовых железистых вод происходит заиление фильтра скважин, в том числе при подтоке вод реки, более богатых кислородом.

С целью увеличения производительности берегового водозабора и его пропускной способности с заменой отработавших погружных электронасосов новыми выгодно устраивать дополнительный ИВПВ I типа с инфильтрационными бассейнами.

В случае в) (сифонный водозабор с ИВПВ) заметное снижение уровня воды в скважинах (на 2—3 м) вызовет значительное уменьшение расхода водозабора и даже прекращение его действия. Поэтому вопрос поддержания уровня воды в водозаборах является главным.

20.3. Примеры рационализации водозаборов подземных вод

Рассмотрим примеры внедрения рационализации эксплуатируемых водозаборов. В одном из крупных городов Прибалтики водопровод получал воду из береговых водозаборов, которые работали с большим числом скважин. Следует отметить, что пропускная способность распределительной сети города была недостаточна. Водопровод имел контррезервуары. Требовалось увеличить подачу воды потребителю. При существовавшей схеме необходимо было увеличить число скважин водозабора, но этому препятствовала недостаточная пропускная способность распределительной сети. Рационализаторское предложение состояло в следующем. Скважины водозабора перевели на равномерную работу с подачей воды в регулирующие резервуары, число и общую емкость которых нарастили. Из этих резервуаров воду забирала насосная станция II подъема, которая увеличивала подачу днем, когда возрастало водопотребление в городе, а ночью направляла ее в контррезервуары, расход которых больше, чем потребление в городе. При этом излишки воды попадали в контррезервуары, из которых вода в часы наибольшего потребления подавалась в распределительную сеть. В ночное время действовал пониженный тариф за элек-

троэнергию. При этих условиях работа труб распределительной сети улучшилась (подача в пики водопотребления с двух сторон), а напор в часы пик поднялся. Все это дало ежегодную экономию более 100 000 руб. при повышении эффективности использования распределительной сети. Это — пример комплексной рационализации водозабора вместе с водопроводом.

Повышение коэффициента полезного действия водозабора, отдельных его элементов, насосов и пр. является результатом рационализации. Рассмотрим некоторые примеры. Широко распространено в скважинах применение погружных электронасосов. Нередко они работают с низким к. п. д. Одна из причин — наличие песка в откачиваемой воде из скважины, что вызывает увеличение зазора между рабочими колесами и направляющим аппаратом. Особенно сильно это явление ощущается в бесфильтровых скважинах из водоносного горизонта, приуроченного к пескам, а также из-за частых остановок и пусков насоса. В бесфильтровых скважинах насосы приходится менять 1—2 раза в год, что удорожает стоимость сооружения. Рационализация в бесфильтровых скважинах сводится к значительному сокращению числа пусков и остановок электронасосов, засыпке на забой гравия с мелкой галькой, а также обоснованному уменьшению дебита скважины. Все это возможно в определенных случаях.

Вредное действие оказывает большая высота всасывания насоса: уменьшается производительность насоса, возникает опасное явление кавитации, связанное с выделением пара и растворенных в воде газов, обусловливающее механическое и химическое разрушение материала насоса. При очень большой высоте всасывания прекращается подача воды, насос работает вхолостую, нагревается и разрушается.

Главный недостаток при регулировании работы погружных электронасосов заключается в том, что применяют асинхронные электромоторы. Частота вращения при практически применяемых мощностях пока не регулируется. Принципиально можно регулировать частоту вращения асинхронного электромотора изменением частоты переменного тока (прямо пропорционально) и числа пар полюсов. Из этого следует, что регулирование асинхронного электромотора сложно и практически пока не применяется. Важным элементом рационализации является повышение к. п. д. всего водозабора в целом и отдельных его составляющих; однако в ряде случаев этот к. п. д. нужно считать пока условным. Он вводится нами впервые. Для всего водозабора и отдельных его элементов авторы вводят к. п. д. в следующем виде:

$$k_c = Q_ф / Q_р, \qquad (20.1)$$

где k_c — коэффициент полезного действия всего водозабора и его составляющих; $Q_ф$ — фактическая производительность, м³/год; $Q_р$ — максимально возможная рациональная производительность, м³/год.

Известно, что скважины с заиляемыми фильтрами нуждаются в периодической чистке. В периоды между регенерацией скважин дебит их постоянно уменьшается. При рациональной регенерации фильтра новый дебит скважин будет больше прежнего и тогда k_c увеличится. При этом, конечно, нужно учесть экономически выгодные затраты на ремонт скважины, оправдывающие повышение k_c. Примером повышения к. п. д. инфильтрационных сооружений систем ИВПВ является гидродинамический к. п. д. инфильтрационных сооружений $k_и$, определяемый по формуле

$$k_и = \Delta Q / Q_б, \qquad (20.2)$$

где ΔQ — расход водозабора за счет ИВПВ; $Q_б$ — расход воды, подаваемый на инфильтрационные бассейны.

Этот коэффициент исследуется в системах ИВПВ I и II типа и обычно не превышает 0,5, но в системе ИВПВ Тбилиси составляет около 0,8—0,9. Высокий $k_и$ ИВПВ Тбилиси объясняется в основном природными условиями: небольшая мощность водоносного слоя (около 6 м) и возможность устройства горизонтального водозабора.

Увеличение $k_и$ (рационализация) возможно при экономически выгодных условиях: увеличении длины расположения водозабора, сокращении расстояния между эксплуатационными скважинами и понижении динамического уровня в водозаборе. При береговых водозаборах, расположенных обычно на первой надпойменной террасе (особенно, когда скважины водозабора по диаметру позволяют установить погружной электронасос бо́льшей производительности и водовод до распределительной сети водопровода имеет запас для увеличения производительности), без больших затрат устраивают дополнительное искусственное питание водозаборов (ИВПВ). Мероприятие сопровождается увеличением производительности водозабора и уменьшением стоимости воды. В Риге еще недавно водоснабжение обеспечивалось в основном за счет ИВПВ I типа с подачей воды около 1 м³/с. Потребность в воде постоянно возрастала. Пропускная способность водовода от системы ИВПВ до города позволяла увеличить расход воды. Кроме того, обнаружилось высокое положение уровней подземных вод на одном из участков, где отсутствовали эксплуатационные скважины. Требовалось добавить небольшое число инфильтрационных бассейнов и устроить дополнительный сифонный водозабор из скважин. Экономический эффект состоял в увеличении производительности ИВПВ и снижении стоимости воды благодаря более эффективному использованию всей системы.

В системе ИВПВ I типа на р. Арагви осуществлена следующая рационализация. Водоносный горизонт приурочен к гравийно-галечниковым отложениям, поэтому дно инфильтрационных бассейнов засыпали привозным дорогим песком. При этом не учитывали наличие песка в самих гравийно-галечниковых отложениях. Когда это выяснили, то предложили эксплуатировать бассейны

без засыпки песком, что обеспечило экономию. Ранее инфильтрационные бассейны имели цикл 2—3 года без очистки от пленки. Было предложено чистить пленки через полгода, что значительно повысило производительность бассейнов, особенно в конце нового инфильтрационного полугодичного цикла. В результате этих двух мероприятий значительно увеличилась производительность системы ИВПВ, сэкономлено около 400 000 руб/год.

ГЛАВА 21. КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

21.1. Принципиальные схемы установок обезжелезивания. Системы водоснабжения с установками обезжелезивания подземных вод

В природных условиях при отсутствии источников бактериального и химического загрязнения подземные воды обычно удовлетворяют гигиеническим требованиям, но при этом могут содержать определенные компоненты в количествах, несколько превышающих установленную государственным стандартом норму. Так, например, наиболее широко на территории СССР представлены железистые подземные воды (с содержанием железа более 0,3 мг/л). Они прослеживаются в таких крупных регионах, как Западно-Сибирская низменность и север европейской территории СССР, на Дальнем Востоке и на севере Казахстана, в центральной части РСФСР, на Украине, в Белоруссии и Прибалтике. Зачастую одновременно с железом в подземных водах присутствуют также марганец, сероводород, аммонийные соединения, фтор и фосфаты (а в ряде случаев и тяжелые металлы).

Наличие в подземных водах загрязняющих компонентов (в частности, железа, марганца и др) значительно усложняет решение проблемы водоснабжения, так как в этом случае без предварительной обработки они не могут быть поданы потребителю.

В настоящее время очистка подземных вод от железа производится на специальных установках наземного типа — станциях обезжелезивания. Здесь имеется множество различных методов и технологических схем водоподготовки, что в значительной мере обусловлено многообразием форм и концентраций железа, с которыми приходится встречаться на практике.

Наиболее простым и распространенным методом удаления железа из воды является аэрация и фильтрование через песчаные фильтры. В этом случае в качестве окислителя используется кислород воздуха. Однако такой метод применим лишь при определенных условиях: железа в подземной воде должно быть не более 5,0 мг/л, сероводорода до 0,5 мг/л, pH=6,7, окисляемость не более 6—7 мг/л и щелочность не менее 1 мг-экв/л. В присутствии

аммонийных соединений и органических веществ, а также при более высоких концентрациях сероводорода процесс очистки воды от железа протекает значительно хуже.

При наличии в подземных водах марганца задачи водоподготовки усложняются. Содержание марганца в питьевой воде не должно превышать 0,1 мг/л. В то же время при обезжелезивании подземных вод эффект деманганации, как правило, оказывается очень низким; для удаления же марганца требуется специальная обработка слоя фильтрующей загрузки дорогостоящими реагентами.

При очистке стоимость использования подземных вод для целей водоснабжения резко возрастает, и это главным образом определяется большими затратами на строительство и эксплуатацию сооружений водоподготовки. Даже в том случае, когда применяют наиболее экономичные методы очистки воды (например, аэрацию и фильтрование) дополнительные затраты оказываются весьма значительными. При этом определенные трудности возникают в связи с необходимостью удаления, обработки и складирования (захоронения) образующихся осадков.

Широкие перспективы в решении проблемы водоподготовки открываются при переходе к геотехнологическим методам очистки подземных вод благодаря созданию искусственных геохимических барьеров — зон с резко измененными физико-химическими и биохимическими условиями, где происходит целенаправленное концентрирование тех или иных элементов непосредственно на водозаборных сооружениях (в водоносном пласте).

Установки обезжелезивания (циклического типа) выполняются в различных модификациях. За рубежом, например, широкое распространение получили так называемые многоскважинные установки (рис. 21, *а*), когда для подачи в пласт аэрированной воды сооружаются специальные скважины, которые размещают на расстоянии 5—10 м по радиусу от эксплуатационной, считается, что число их должно быть не менее пяти. Такие установки в основном используют при очистке подземных вод неглубоко залегающих горизонтов в схемах водоснабжения небольших объектов. Их обычно подсоединяют к сборному резервуару. Принцип их работы следующий (рис. 21, *б*). Насос забирает воду из резервуара, которая аэрируется (с помощью эжекторного устройства) или насыщается кислородом (с помощью оксигенератора), и подает ее в питательные скважины. По завершении цикла закачки в работу включается погружной насос, установленный в эксплуатационной скважине, и очищенная в пласте вода сначала перекачивается в резервуар, а далее направляется потребителю. Опыт эксплуатации многоскважинных установок имеется в Великобритании, Финляндии, Швеции и ФРГ.

Устройство дополнительных (питательных) скважин вызывает существенное удорожание установок (особенно это сказывается тогда, когда подземные воды находятся на большой глубине). По

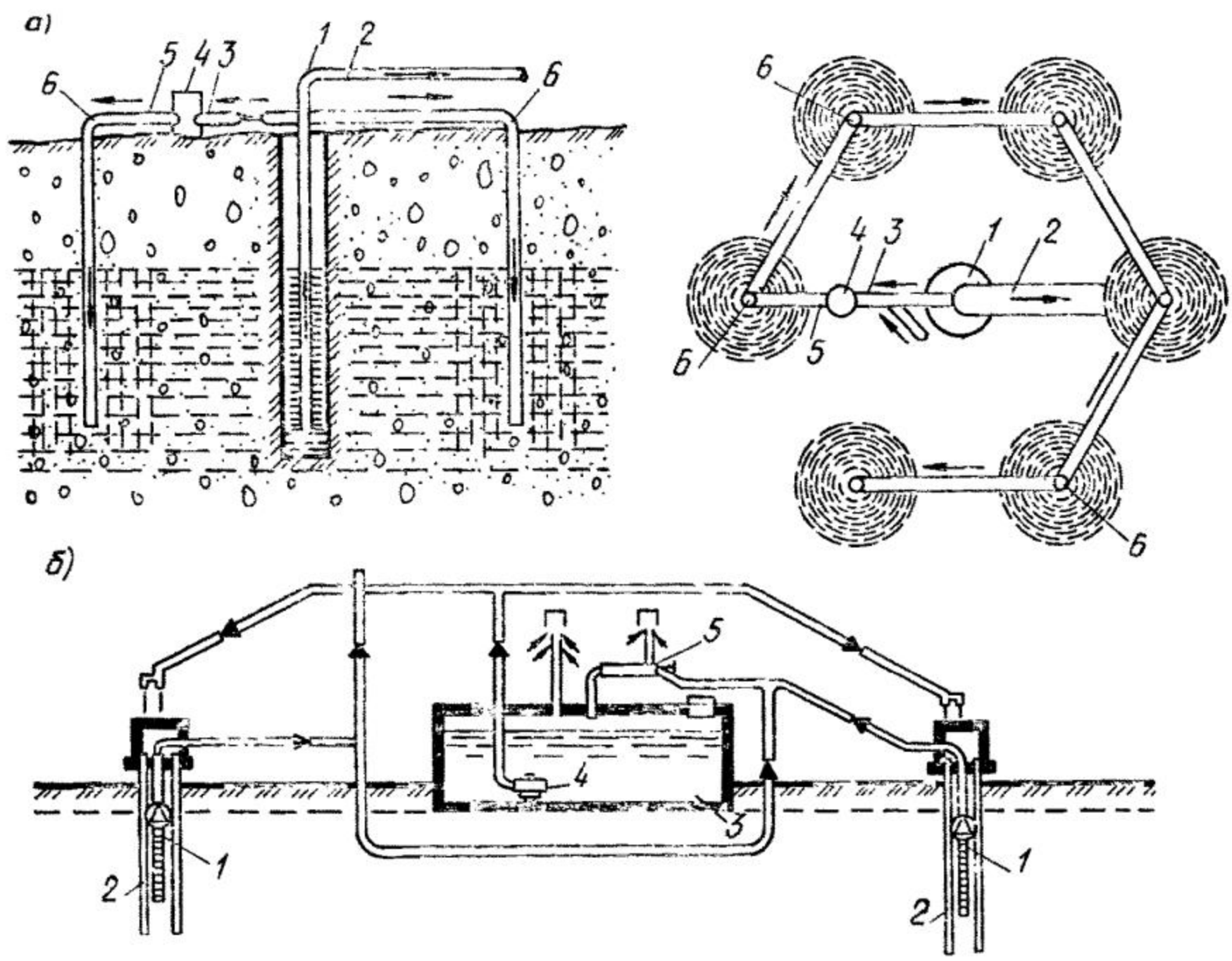


Рис. 21.1. Схема (а) и система (б) многоскважинной установки для обезжелезивания подземных вод в пласте

1 — водозаборная скважина; *2* — трубопровод подачи воды потребителю; *3, 5* — то же, в пласт; *4* — устройство для ввода реагентов или аэрации воды; *6* — поглощающие скважины

технологическим же соображениям они не являются столь необходимым элементом установок, так как закачку в пласт окислителя можно осуществлять и непосредственно через водозаборные скважины.

В СССР применяют односкважинные установки (рис. 21.2). В зависимости от конкретных гидрогеологических условий и технического состояния скважин установки выполняются в двух модификациях: со свободным наливом или с принудительной закачкой в пласт аэрированной воды.

Во всех односкважинных установках обсадная колонна скважины превращается в своеобразную барботажную колонну, в которой происходит полное смешение воды с воздухом, разделение смеси и удаление избытка воздуха и отдуваемых из воды газов (CO_2 и H_2S). При движении воды по колонне в направлении забоя размер диспергированных в воде воздушных пузырей не остается постоянным. С одной стороны, в результате коалесценции часть маленьких пузырей укрупняется и они всплывают (двигаясь противоточно по отношению к воде); с другой — за счет по-

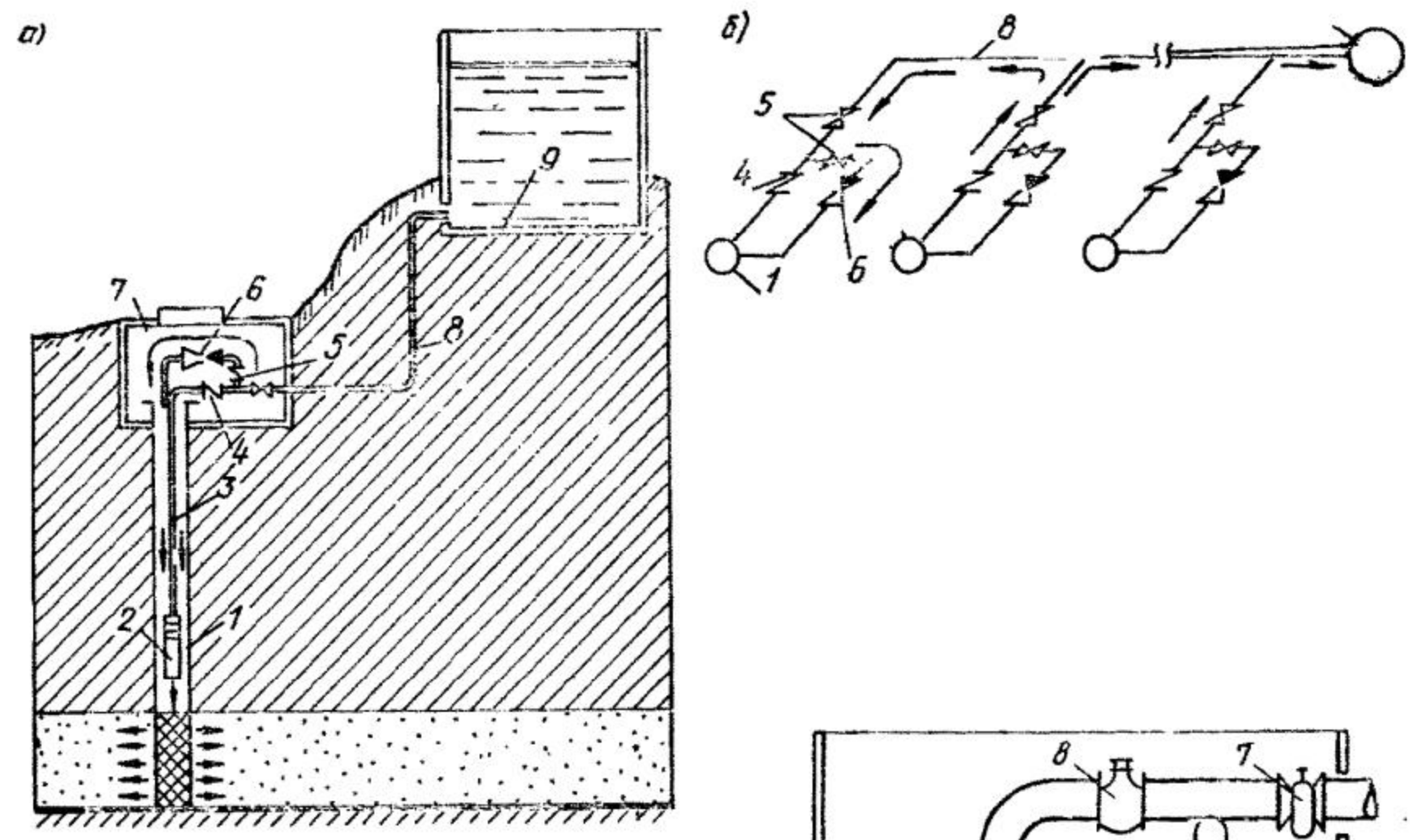


Рис. 21.3. Система водоснабжения (а, б) с установками обезжелезивания циклического типа

1 — скважина; *2* — погружной насос; *3* — водоподъемная колонна; *4* — обратный клапан; *5* — задвижка; *6* — эжектор; *7* — колодец; *8* — водовод; *9* — резервуар

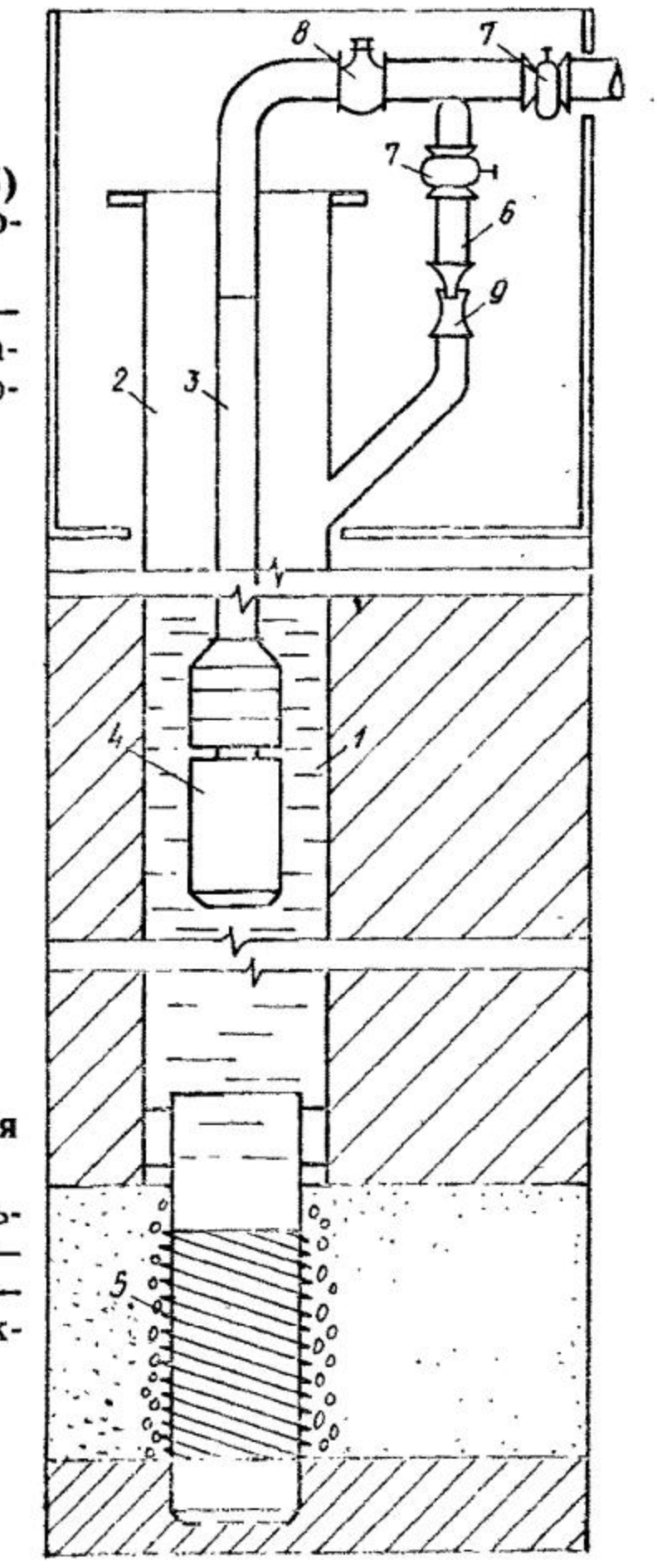


Рис. 21.2. Установка для обезжелезивания подземных вод в пласте

1 — скважина; *2* — оголовок; *3* — водоподъемная колонна; *4* — погружной насос; *5* — фильтр; *6* — подающий трубопровод; *7* — задвижка; *8* — обратный клапан; *9* — эжектор

вышения давления и соответственно растворимости воздуха в воде наблюдается уменьшение размеров пузырей. Эти два противоположно направленных процесса обеспечивают дополнительный контакт воды с воздухом, что в конечном счете приводит к увеличению растворимости кислорода в воде. В установках со свободным наливом в скважину аэрированной воды концентрация кислорода обычно составляет 8—12 мг/л, что по значениям близко к растворимости O_2 при $P=0{,}1$ МПа в водах с температурой 7—10° С. В случае же принудительной закачки воды в пласт аэрированной воды (когда оголовок скважин является герметичным), а для удаления избытка воздуха и отдуваемых из воды газов применяется клапан-вантуз или вентиль, отрегулированный на заданное избыточное давление, под крышкой оголовка достигается более высокая концентрация кислорода — до 20 мг/л.

Установки на рис. 21.2 могут использоваться в различных системах водоснабжения. Простейшие из таких систем, когда допустимо применение установок со свободным наливом в скважину аэрированной воды, показаны на рис. 21.3. В условиях, требующих принудительной закачки в пласт аэрированной воды, вопрос о применимости установки по той или иной схеме должен решаться в каждом конкретном случае с учетом специфики объекта. Здесь возможны различные варианты. В частности, вместо стационарного оборудования павильонов скважин повысительными насосами (или компрессорами) можно пойти по пути использования легких передвижных насосных (или компрессорных) установок или, наоборот, устроить единый централизованный узел для приготовления аэрированной воды и подачи ее с соответствующими расходом и напором в каждую скважину.

21.2. Моделирование процессов «зарядки» кислородом водовмещающих пород

Основные положения и исходные уравнения. В период закачки в пласт аэрированной воды происходит адсорбция (точнее, хемосорбция) кислорода на породах пласта. Центром для адсорбции O_2 при этом служат как ионы металлов, так и различные минеральные и глинистые частицы, осажденные на поверхности и заключенные в порах скелета среды. Адсорбция кислорода в данном случае является лимитирующей стадией таких реакций, как контактное окисление поверхностных ионов и поверхностное комплексообразование, благодаря которым породы пласта приобретают своеобразные свойства — они становятся реакционноспособными. Эту совокупность процессов, не поддающихся раздельному изучению, в дальнейшем будем условно называть «зарядкой» пласта.

Процесс «зарядки» водовмещающих пород кислородом может

быть описан известной системой уравнений динамики адсорбции. Для случая радиального потока эти уравнения имеют вид

$$n_0 \frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} + \frac{q_i \partial C_{O_2}}{r \partial r} + \frac{\partial C_{\overline{O}_2}}{\partial t} = 0; \qquad (21.1)$$

$$\frac{\partial C_{\overline{O}_2}}{\partial t} = F\left(C^*_{\overline{O}_2},\ C_{O_2}\right), \qquad (21.2)$$

где $C_{O_2}(r, t)$ — концентрация растворенного в воде и $C_{\overline{O}_2}(r, t)$ — адсорбированного на поверхности пород кислорода в сечении на расстоянии r от скважины в момент времени t; q_i — при закачке воды в пласт (для $i=1$) принимается равным: $q_3 = Q_3/2\pi M$, а при откачке (для $i=2$) $q_i = -q_0$ и $q_0 = Q_0/2\pi M$; M — мощность пласта; $F(C^*_{\overline{O}_2}, C_{O_2})$ — кинетическая функция, отражающая механизм адсорбции кислорода.

При дальнейшем анализе ограничимся двумя простейшими механизмами необратимой адсорбции кислорода, считая что кинетическая функция может быть представлена в виде

$$F\left(C^*_{\overline{O}_2},\ C_{O_2}\right) = \begin{cases} C^*_{\overline{O}_2}\delta(t-\lambda_0); & (21.2а) \\ \alpha_{O_2} C_{O_2}, & (21.2б) \end{cases}$$

где $C^*_{\overline{O}_2}$ — предельная адсорбционная емкость пород по отношению к кислороду; $\delta(t-\lambda_0)$ — дельта-функция Дирака и λ_0 — величина, равная

$$\lambda_0 = \frac{(n_0 + \Gamma_{O_2})(r^2 - r_0^2)}{2q_3}; \quad \Gamma_{O_2} = \frac{C^*_{\overline{O}_2}}{C_{O_{2_0}}}. \qquad (21.3)$$

Представление кинетической функции в виде (21.2а) предполагает, что адсорбция кислорода является необратимой, а сам процесс протекает с бесконечно большой скоростью; в случае (21.2б) учитывается конечная скорость накопления кислорода на породах пласта (здесь α_{O_2} — константа скорости адсорбции).

Динамика «зарядки» пород при необратимой мгновенной адсорбции кислорода. Для стадии закачки в пласт аэрированной воды решение системы уравнений (21.1), (21.2а) отыскивается при следующих условиях:

$$t = 0,\ r \geqslant r_0;\ C_{O_2}(r, t) = C_{\overline{O}_2}(r, t) = 0; \qquad (21.4)$$

$$r = r_0,\ t > 0;\ C_{O_2}(r, t) = C_{O_{2_0}}. \qquad (21.5)$$

Применяя к (21.1)—(21.2а) и (21.4), (21.5) преобразование Лапласа по t, имеем

$$\frac{q_3}{r}\frac{d\overline{C}_{O_2}}{dr} = n_0 p \overline{C}_{O_2} - C^*_{\overline{O}_2}\exp(-\lambda_0 p); \qquad (21.6)$$

$$\bar{C}_{O_2}(r_0, p) = \frac{C_{O_{2_0}}}{p}, \qquad (21.7)$$

где $\bar{C}_{O_2}(r, p) = \int_0^\infty C_{O_2}(r, t)\exp(-pt)dt$ и p — параметр преобразования Лапласа. При этом учтено, что

$$\int_0^\infty \delta(t - \lambda_0)\exp(-pt)\,dt \doteqdot \exp(-\lambda_0 p).$$

Решение уравнения (21.6) при условии (21.7) имеет в изображениях следующий вид:

$$\bar{C}_{O_2}(r, p) = \frac{C_{O_{2_0}}}{p}\exp(-\lambda_0 p). \qquad (21.8)$$

Переходя в (21.8) к оригиналу, получим

$$C_{O_2}(r, t) = C_{O_{2_0}} H(t - \lambda_0). \qquad (21.9а)$$

Соответственно для $C_{\bar{O}_2}(r, t)$ можем записать

$$C_{\bar{O}_2}(r, t) = C^*_{\bar{O}_2} H(t - \lambda_0), \qquad (21.9б)$$

где $H(t - \lambda_0)$ — единичная функция, которая при $t < \lambda_0$ равна 1, а при $t > \lambda_0$ равна 0.

Из самого определения кинетической функции (21.2 а) следует, что адсорбция кислорода имеет место лишь при $t = \lambda_0$ (при $t \neq \lambda_0$ дельта-функция Дирака равна 0). Следовательно, на основе соотношения (21.3) при $t = \lambda_0$ можно найти положение границы фронта адсорбции

$$r^*(t) = \sqrt{r_0^2 + 2q_3 t/(n_0 + \Gamma_{O_2})}. \qquad (21.10)$$

В данном случае в период закачки аэрированной воды в пласт одновременно с фронтом адсорбции образуется и фронт поршневого вытеснения; последний $r_f = \sqrt{r_0^2 + 2q_3 t/n_0}$. При $r < r^*$ никаких изменений концентраций $C_{O_2}(r, t)$ и $C_{\bar{O}_2}(r, t)$ не происходит, и в области $r_0 < r < r^*$ они соответственно равны $C_{O_{2_0}}$ и $C_{\bar{O}_2}^*$. На границе $r^*(t)$ концентрации $C_{O_2}(r, t)$ и $C_{\bar{O}_2}(r, t)$ изменяются скачком до нуля, и в области $r^* < r < r_f$ они также равны нулю, а за пределами фронта вытеснения находятся железистые подземные воды.

К моменту окончания закачки фронт адсорбции распространяется на расстояние $r^*(t_з) = R_0$ от скважины, которое может быть рассчитано по (21.10) при $t = t_з$; соответственно при этом $r^*_f = \sqrt{r_0^2 + 2q_з t_з/n_0}$. Графики, отражающие распределение концентраций в зоне «зарядки» пласта при $t = t_з$, показаны на рис. 21.4.

В период откачки вода, содержащаяся в зоне $r_0<r<R_0$, с концентрацией кислорода равной $C_{O_{20}}$, будет отбираться из скважины вплоть до момента времени $t_0^{**}=Q_3t_3n_0/Q_0(n_0+\Gamma_{O_2})$. При этом в силу принятой гипотезы о необратимости адсорбции, поступление в эту зону в момент времени $t^*=Q_3t_3\Gamma_{O_2}/Q_0(n_0+\Gamma_{O_2})$ обескислороженной воды не вызывает изменения $C_{\overline{O}_2}^*$ и поэтому при $t>t_0^{**}$ концентрация кислорода в отбираемой воде окажется также равной нулю (см. рис. 21.4).

Количество кислорода, которое за цикл закачка-откачка накопилось в зоне «зарядки» пласта, может быть рассчитано по формуле

$$P_{O_2}=Q_3t_3C_{O_{20}}-Q_0t_0^{**}C_{O_{20}}=Q_3t_3\xi, \qquad (21.11)$$

где

$$\xi=C_{O_{20}}\Gamma_{O_{20}}/(n_0+\Gamma_{O_2}). \qquad (21.12)$$

Динамика «зарядки» пород при необратимой адсорбции кислорода, протекающей по реакции 1-го порядка. В этом случае распределение концентрации $C_{O_2}(r,t)$ и $C_{\overline{O}_2}(r,t)$ в период закачки в пласт аэрированной воды определяется из решения системы уравнений (21.1), (21.2б) при $q_i=q_3$. Краевые условия принимаются в форме (21.4), (21.5).

Решение этой задачи известно и имеет вид

$$C_{O_2}(r,t)=C_{O_{20}}\exp\left(\frac{-\alpha_{O_2}\lambda_1}{n_0}\right)H(t-\lambda_1); \qquad (21.13)$$

$$C_{\overline{O}_2}(r,t)=\alpha_{O_2}C_{O_{20}}(t-\lambda_1)\exp\left(\frac{-\alpha_{O_2}\lambda_1}{n_0}\right)H(t-\lambda_1), \qquad (21.14)$$

где $H(t-\lambda_1)$ — единичная фуикция;

$$\lambda_1=\frac{n_0(r^2-r_0^2)}{2q_3}. \qquad (21.15)$$

Из (21.14) следует, что максимальное количество адсорбированного кислорода накапливается вблизи скважины (при $r=r_0$, $\lambda_1=0$ и $C_{\overline{O}_2}(r_0,t)=\alpha_{O_2}C_{O_{20}}t$); по мере удаления от скважины (с ростом r) концентрация снижается до нуля (при $r=r_f$, $\lambda_1=t$ соответственно имеем $C_{\overline{O}_2}(r_f,t)=0$). Распределение концентраций на момент окончания закачки в пласт аэрированной воды показано на рис. 21.5, *а*.

При принятом здесь механизме адсорбции процесс «зарядки» пород кислородом продолжается и в период откачки воды из скважины вплоть до момента времени $t_0^*=Q_3t_3/Q_0$, пока не будет отобрана вся поданная в пласт вода. Это является существенным отличием от случая, рассмотренного в предыдущем разделе.

В период откачки в окрестности скважины будут иметь место две области (рис. 21.5, *б*), разделенные между собой перемещающейся во времени границей фронта вытеснения аэрированной воды

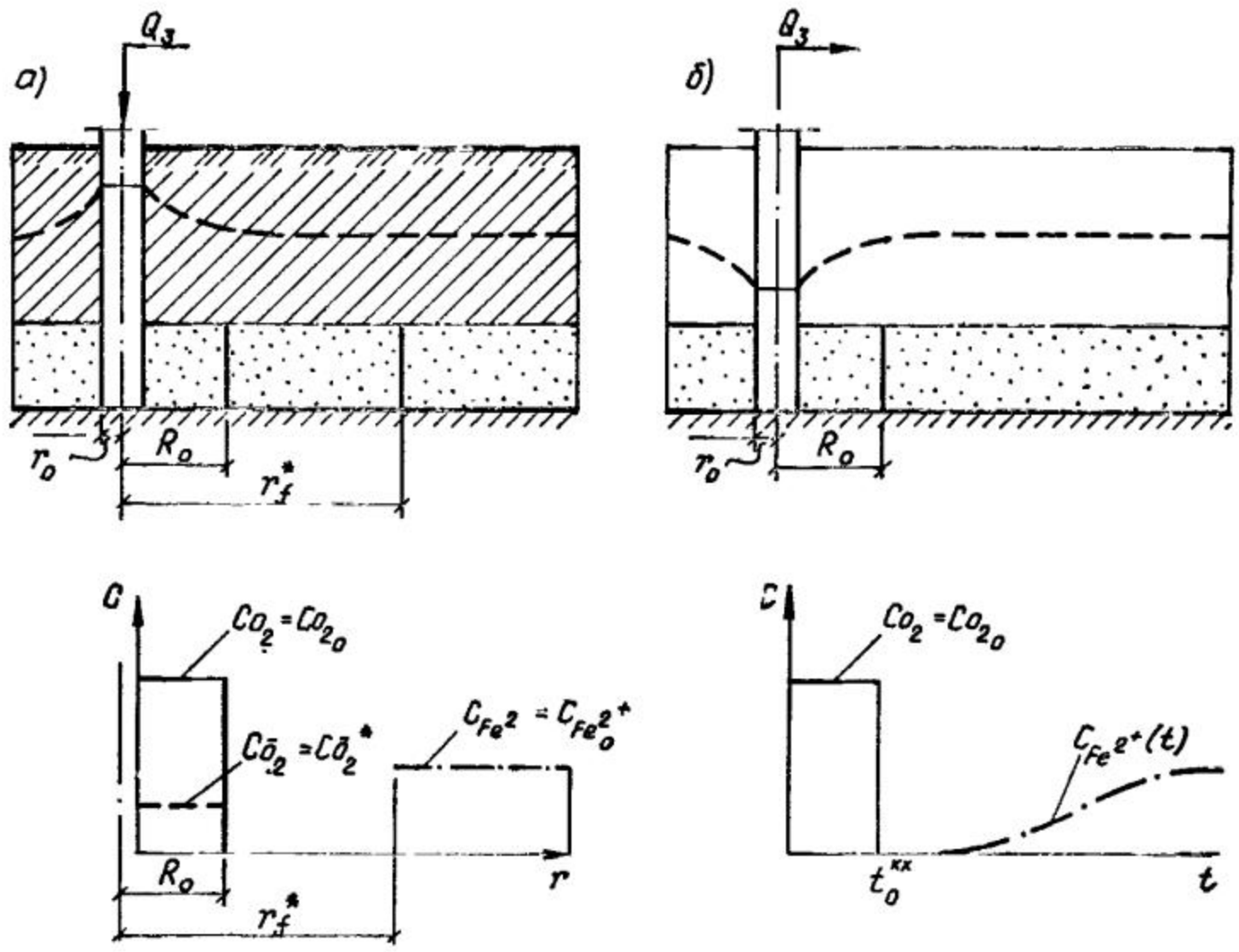


Рис. 21.4. Схема и графики гидродинамических и кинетических областей при работе установок обезжелезивания

а — стадия закачки (момент времени $t=t_з$); *б* — стадия откачки

$$R(t) = \sqrt{r_f^{*2} - (2q_0 t / n_0)}. \qquad (21.16)$$

В первой области $r_0 < r < R(t)$, где содержится частично обескислороженная вода, продолжается процесс адсорбции кислорода; во второй же области $R(t) < r < r_f^*$ находится подземная вода (процессы, протекающие в этой области, анализируются в разд. 21.3).

Распределение концентраций $C_{O_2}(r, t)$ и $C_{\bar{O}_2}(r, t)$ в период откачки воды из скважины определяется из решения системы уравнений (21.1), (21.2 б) при $q_i = -q_0$. Начальные условия для решения задачи принимаются согласно (21.13) и (21.14) при $t = t_з$, а граничное условие имеет вид $C_{O_2}(r_f^*, t) = 0$.

Решение задачи достаточно просто находится методом преобразования Лапласа. Поэтому, опуская промежуточные выкладки, запишем лишь окончательные расчетные формулы. Имеем:

для первой области $r_0 < r < R(t)$

$$C_{O_2}(r, t) = C_{O_{2_0}} \exp\left(-\frac{\alpha_{O_2}\lambda_1}{n_0} - \frac{\varphi_{O_2} t}{t_0^*}\right); \qquad (21.17а)$$

$$C_{\bar{O}_2}(r, t) = \alpha_{O_2} C_{O_{2_0}} (t_з - \lambda_1) \left\{1 + \frac{t_0}{(t_з - \lambda_1)\varphi_{O_2}} \times \right.$$

$$\left. \times \left[1 - \exp\left(\frac{\varphi_{O_2} t}{t_0^*}\right)\right]\right\} \exp\left(-\frac{\alpha_{O_2}\lambda_1}{n_0}\right); \qquad (21.17б)$$

для второй области $R(t) < r < r_f^*$

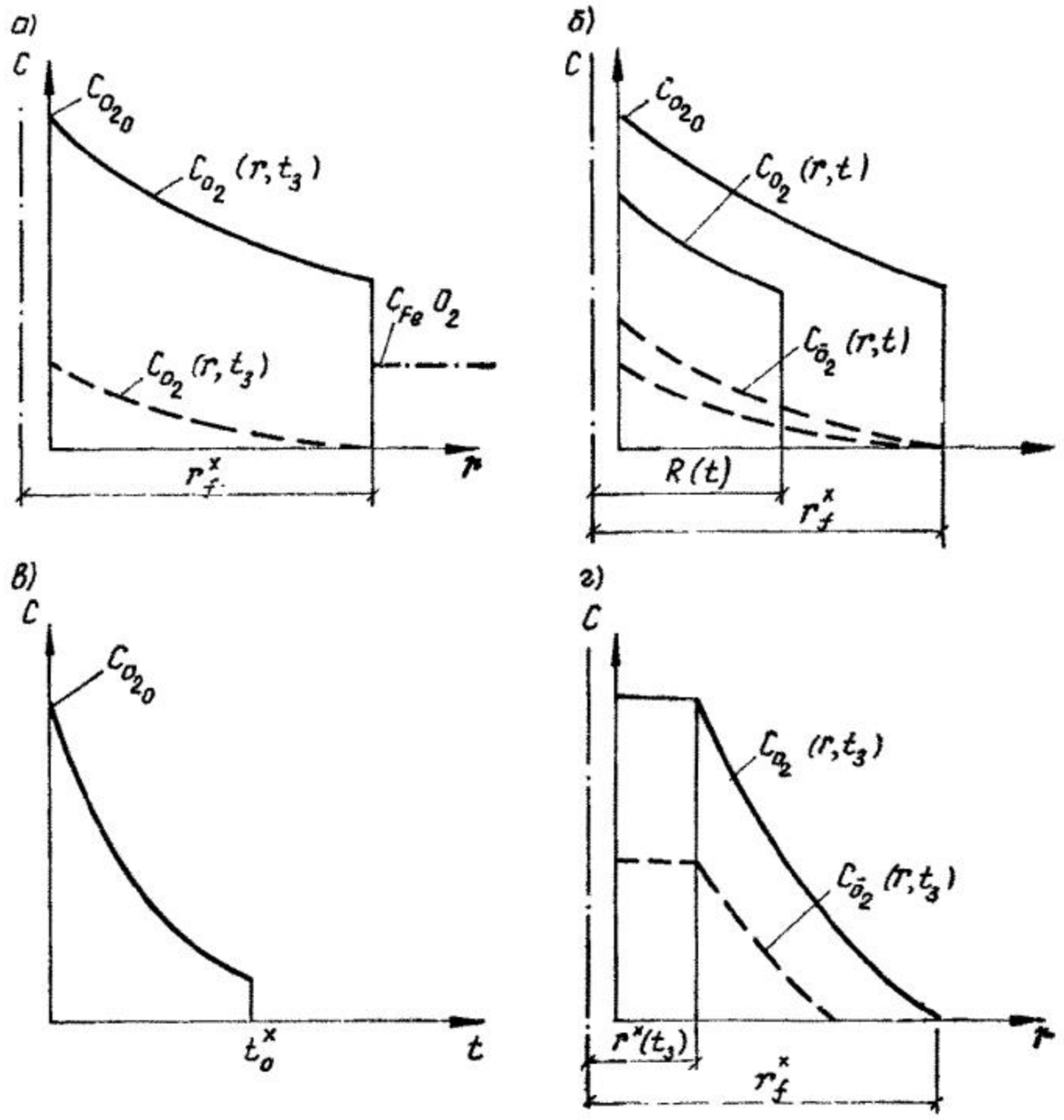


Рис. 21.5. Распределение концентраций кислорода в зоне «зарядки» пласта
а — стадия закачки (момент времени $t=t_з$); *б* — стадия откачки; *в* — выходная кривая $C_{O_2}(r_0, t)$; *г* — стадия закачки (момент времени $t=t_з$)

$$C_{O_{2_0}}(r, t) = 0; \tag{21.18а}$$

$$C_{\overline{O}_2}(r, t) = \alpha_{O_2} C_{O_{2_0}}(t_з - \lambda_1) \left\{ 1 + \frac{t_0^*}{(t_з - \lambda_1)\varphi_{O_2}} \times \right.$$

$$\left. \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\varphi_{O_2}(t_з - \lambda_1)}{t_з} \right) \right] \right\} \exp\left(\frac{-\alpha_{O_2}\lambda_1}{n_0} \right), \tag{21.18б}$$

где
$$\varphi_{O_2} = \frac{\alpha_{O_2} t_з}{n_0} \left(1 + \frac{Q_з}{Q_0} \right).$$

Содержание кислорода в воде, отбираемой из скважины, определяется по (21.17а) при $r=r_0$; в этом случае $\lambda_1=0$ и соответственно имеем

$$C_{O_2}(r_0, t) = C_{O_{2_0}} \exp\left(-\frac{\varphi_{O_2} t}{t_0^*} \right). \tag{21.19}$$

График выходной кривой $C_{O_2}(r_0, t)$ показан на рис. 21.5, *в*. Формула (21.19) правомерна при $t \leqslant t_0^*$; при $t > t_0^*$ $C_{O_2}(r_0, t) = 0$.

Зная $C_{O_2}(r_0, t)$ при $t \leqslant t_0^*$, несложно рассчитать количество кислорода, которое за цикл закачки-откачки адсорбировалось в зоне «зарядки» водоносного пласта. Имеем

$$P_{O_2} = Q_3 t_3 C_{O_{2_0}} - Q_0 \int_0^{t_0^*} C_{O_2}(r_0, t)\, dt, \tag{21.20}$$

следовательно,

$$P_{O_2} = Q_3 t_3 \bar{\xi},$$

где

$$\bar{\xi} = C_{O_{2_0}} \{1 - \varphi_{O_2}^{-1} [1 - \exp(-\varphi_{O_2})]\}. \tag{21.21}$$

21.3. Моделирование процесса окисления железа в зоне «зарядки» пласта

Основные положения и исходные уравнения. При такой технологии очистка подземной воды достигается исключительно за счет реакций, протекающих на активизированной поверхности пород (при полном отсутствии в воде растворенного кислорода). Естественно, что при этом уменьшается количество адсорбированного кислорода (он расходуется на окисление железа и других ингредиентов); снижается соответственно и реакционная активность зоны «зарядки» пласта.

Следует отметить, что падение активности является не только следствием вышеупомянутых реакций. Оно происходит также в результате блокирования активных центров различного рода нереакционноспособными (трудноокисляемыми) органическими соединениями. Собственно говоря, из-за недостатка информации о всех имеющихся здесь процессах, по-видимому, вряд ли рационально стремиться к максимальной общности их описания. Поэтому ограничимся лишь анализом простейшего случая, когда в зоне «зарядки» пласта имеет место одна необратимая реакция между водным железом и адсорбированным кислородом.

В такой постановке процесс описывается следующей системой уравнений

$$\begin{gathered} n_0 \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial t} - \frac{q_0}{r} \frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial r} + \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}} = 0 \\ \frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial t} = -\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2} C_{Fe^{2+}}, \end{gathered} \tag{22.22}$$

где β — стехиометрический коэффициент, который равен 0,143, т. е. будем считать, что кислород, адсорбированный на породах пласта, расходуется только на окисление железа.

Ниже, на основе уравнений (22.22) будут проанализированы две расчетные схемы: первая соответствует условиям, когда в

зоне «зарядки» пласта исходная концентрация адсорбированного кислорода всюду постоянная (случай необратимой мгновенной адсорбции кислорода); вторая — отражает случай неравномерной «зарядки» пласта (что наблюдается при необратимой адсорбции кислорода, протекающей по реакции 1-го порядка).

Динамика окисления железа (II) при равномерном начальном распределении адсорбированного кислорода. При необратимой мгновенной адсорбции кислорода (см. рис. 21.4) к моменту окончания закачки у скважины имеют место две зоны: первая $r_0 < r < R_0$, где $C_{O_2}(r, t_з) = C_{O_{2_0}}$ и $C_{\overline{O}_2}(r, t_з) = C_{\overline{O}_2}{}^*$, и вторая $R_0 < r < r_f{}^*$, в пределах которой $C_{O_2}(r, t_з) = C_{O_2}(r, t_з) = 0$. До начала процесса откачки подземная вода находится за границей фронта вытеснения и поэтому реакция между железом (II) и адсорбированным кислородом здесь начинается не с момента времени $t = 0$, а лишь при $t \geqslant t^*$, где t^* — время, за которое частицы проходят путь от $r_f{}^*$ до R_0.

Время t^* определяется из следующего соотношения

$$r_f^{*2} - R_0^2 = 2q_0 t^* / n_0$$

и, следовательно, $t^* = Q_з t_з \Gamma_{O_2} / Q_0 (n_0 + \Gamma_{O_2})$.

Краевые условия для решения (22.22) записываются в виде

$$t = t^*,\ r \leqslant R_0;\ C_{\overline{O}_2}(r, t) = C^*{}_{Fe^{2+}}(r, t) = 0; \qquad (21.23а)$$

$$r = R_0,\ t > t^*;\ C_{Fe^{2+}}(r, t) = C_{Fe_0{}^{2+}}, \qquad (21.23б)$$

где $C_{Fe_0{}^{2+}}$ — концентрация железа (II) в подземной воде.

Решение этой задачи имеет вид

$$\frac{C_{Fe^{2+}}}{C_{Fe_0{}^{2+}}} = \frac{\exp(T)}{\exp(X) - 1 + \exp(T)}; \qquad (21.24)$$

$$\frac{C_{\overline{O}_2}}{C^*{}_{\overline{O}_2}} = \frac{\exp(X)}{\exp(X) - 1 + \exp(T)}, \qquad (21.25)$$

где $$X = \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C^*{}_{O_{2_0}} (R_0^2 - r^2)}{2q_0},\quad T = \beta\sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0{}^{2+}} \left[t - t^* - \frac{n_0 (R_0^2 - r^2)}{2q_0}\right]. \qquad (21.26)$$

Графики изменения $C_{Fe^{2+}}/C_{Fe_0{}^{2+}}$ и $C_{\overline{O}_2}/C_{\overline{O}_2}{}^*$ по T при различных X показаны на рис. 21.6. Из данных рис. 21.6, *а* видно, что при любом фиксированном T концентрация железа (II) убывает с ростом X, а в каждой точке (т. е. при фиксированном X) увеличивается во времени T. Эти изменения обусловлены снижением концентрации адсорбированного кислорода (рис. 21.6, *б*) и соответственно падением реакционной активности зоны «зарядки» пласта.

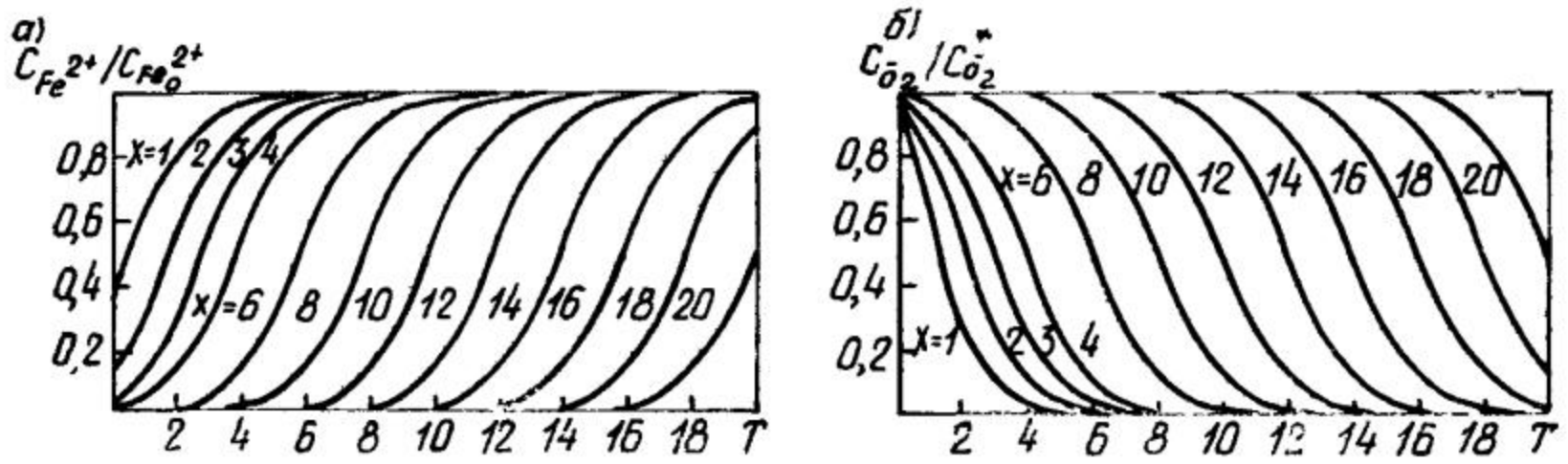


Рис. 21.6. Распределение

$$C_{Fe^{2+}}/C_{Fe^{2+}}=f(X,\ T) \text{ и } C_{\bar{O}_2}/C^*_{\bar{O}_2}=f(X,\ T)$$

Динамика окисления железа (II) при неравномерном начальном распределении концентрации адсорбированного кислорода. Найдем решение системы уравнений (21.22) при следующих условиях:

$$t=0,\ r<r_f;\ \ C_{\bar{O}_2}(r,\ t)=f(r),\ C_{Fe^{2+}}(r,\ t)=0; \qquad (21.27)$$

$$r=r_f^*,\ t>0;\ \ C_{Fe^{2+}}(r,\ t)=C_{Fe_0^{2+}}, \qquad (21.28)$$

где $f(r)$ — функция, описывающая распределение концентрации адсорбированного кислорода в зоне «зарядки» пласта ($r_0<r<r_f^*$) перед началом откачки.

Положим

$$\tau=t-\lambda_3,\ \lambda_3=t_0^*-\frac{n_0(r^2-r_0^2)}{2q_0}. \qquad (21.29)$$

В новых переменных τ, λ_3 уравнения (21.22), (21.23) запишутся в виде

$$n_0\frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial\lambda_3}=-\sigma_{Fe^{2+}}C_{\bar{O}_2}C_{Fe^{2+}}; \qquad (21.30)$$

$$\frac{\partial C_{\bar{O}_2}}{\partial\tau}=-\beta\sigma_{Fe^{2+}}C_{\bar{O}_2}C_{Fe^{2+}}. \qquad (21.31)$$

Рассмотрим случай, когда при $\tau=0$ (т. е. в момент поступления железистых подземных вод в зону «зарядки» пласта) начальное распределение концентрации адсорбированного кислорода описывается формулой (21.18*б*). Тогда, учитывая, что $(t_3-\lambda_1)=Q_0\lambda_3/Q_3$, условия для решения уравнений (21.30), (21.31) запишем в виде

$$C_{\bar{O}_2}|_{\tau=0}(\lambda_3,\ \tau)=\frac{\alpha_{O_2}C_{O_2}Q_0\lambda_3}{Q_3}\left\{1+\frac{t_0^*Q_3}{\lambda_3Q_0\varphi_{O_2}}\times\right.$$

$$\left.\times\left[1-\exp\left(-\frac{\lambda_3\varphi_{O_2}}{t_0^*}\right)\right]\right\}\exp\left[-\frac{\alpha_{O_2}Q_0}{n_0Q_3}(t_0^*-\lambda_3)\right]; \qquad (21.32)$$

$$C_{Fe^{2+}}|_{\lambda_3=0}(\lambda_3,\ \tau)=C_{Fe_0^{2+}}. \qquad (21.33)$$

Несложно показать, что в этом случае искомые функции $C_{\bar{O}_2}$ и $C_{Fe^{2+}}$ определяются выражениями:

$$C_{\bar{O}_2} = C_{\bar{O}_2}(\lambda_3, 0)\frac{\exp(X')}{\exp(X') + \exp(T') - 1}; \qquad (21.34)$$

$$C_{Fe^{2+}} = C_{Fe_0^{2+}}\frac{\exp(T')}{\exp(X') + \exp(T') - 1}, \qquad (21.35)$$

где

$$X' = \sigma_{Fe^{2+}} C_{O_{2_0}} \lambda_3 \left\{1 - \frac{t_0^*}{\lambda_3 \varphi_{O_2}}\left[1 - \exp\frac{(\lambda_3 \varphi_{O_2})}{t_0^*}\right]\right\}; \qquad (21.36)$$

$$T' = \beta\sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}}(t - \lambda_3). \qquad (21.37)$$

При определении концентрации железа в точке $r = r_0$ в (21.36), (21.37) следует принять $\lambda_3 = t_0^*$, тогда получим

$$X_0' = \sigma_{Fe^{2+}} t_0^* \bar{\xi}, \quad \bar{\xi} = C_{O_{2_0}}\{1 - \varphi_{O_2}^{-1}[1 - \exp(-\varphi_{O_2})]\}; \qquad (21.38)$$

$$T_0' = \beta\sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}}(t - t_0^*). \qquad (21.39)$$

Собственно говоря, мы имеем два решения одной и той же задачи, описывающей процесс очистки воды от железа в пласте при создании искусственных окислительных геохимических барьеров, отличающихся друг от друга лишь изначальной гипотезой о механизме адсорбции кислорода на водовмещающих породах. Полученные при этом расчетные зависимости имеют одинаковый вид; различие состоит лишь в выражениях для безразмерных параметров времени и координаты.

Для сопоставления этих решений рассмотрим следующий пример. Пласт имеет мощность $M = 20$ м и представлен песчаными отложениями, пористость которых $n_0 = 0{,}25$. Содержание железа $C_{Fe_0^{2+}}$ в подземных водах, приуроченных к этому коллектору, составляет 2 мг/л. Пусть задано, что закачка аэрированной воды в пласт при $C_{O_{2_0}} = 10$ мг/л проводилась с расходом $Q_з = 30$ м³/ч в течение $t_з = 120$ ч; отбиралась вода из скважины с расходом $Q_0 = 60$ м³/ч. Допустим, что в результате этого эксперимента (на основе обработки опытной выходной кривой) определены $\sigma_{Fe^{2+}} = 0{,}5$ (мг·ч/л)$^{-1}$ и $\bar{\xi} = 7{,}3$ мг/л.

Располагая этими данными, проведем расчет распределения концентраций железа в зоне «зарядки» пласта по решениям (21.24) и (22.35).

В случае необратимой мгновенной адсорбции кислорода процесс обезжелезивания протекает в зоне $r_0 < r < R_0$ [где R_0 — граница фронта адсорбции, которая определяется по (21.10) при $t = t_з$] и начинается с момента времени t^*, когда фронт подземных вод с исходной концентрацией $C_{Fe_0^{2+}}$ пройдет расстояние от r_f^* до R_0.

Для расчета R_0 и t^* необходимо знать Γ_{O_2} — константу Генри изотермы адсорбции кислорода. Последняя может быть вычислена на основе (21.12). Имеем

$$\frac{\bar{\xi}}{C_{O_{2_0}}} = \frac{\Gamma_{O_2}}{(n_0+\Gamma_{O_2})} = 0{,}73 \qquad (21.40)$$

и, следовательно,

$$\Gamma_{O_2} = \frac{0{,}73 \cdot n_0}{1-0{,}73} = 0{,}676. \qquad (21.41)$$

При этом $r_f^* \approx \sqrt{Q_з t_з/\pi M n_0} = 15{,}14$ м, $R_0 \approx \sqrt{Q_з t_з/\pi M (n_0+\Gamma_{O_2})} = 7{,}87$ м и $t^* = \Gamma_{O_2} t_0^*/(n_0+\Gamma_{O_2}) = 43{,}8$ ч.

В случае необратимой адсорбции кислорода, протекающей по реакции 1-го порядка, процесс обезжелезивания идет во всей области от r_0 до r_f^*, ранее занятой аэрированной водой. При этом для выполнения расчетов по (21.35) и, в частности, при определении аргумента X' необходимо знать величину φ_{O_2}. При известных $\bar{\xi}$ и $C_{O_{2_0}}$ последняя может быть установлена на основе (21.21); здесь имеем $\varphi_{O_2} = 3{,}6$.

Графики, иллюстрирующие распределение концентраций железа в зоне «зарядки» пласта, рассчитанные соответственно по формулам (21.24) и (21.35), приведены на рис. 21.7.

В первом случае, при необратимой мгновенной адсорбции в области $r_0 < r < R_0$ при $t \leqslant t^*$, как уже отмечалось ранее, концентрация адсорбированного кислорода — величина постоянная и всюду она равна: $C_{\bar{O}_2}^* = \Gamma_{O_2} C_{O_{2_0}}$. Здесь скорость реакции оказывается достаточно большой и поэтому фронт железистых подземных вод (рис. 21.7, *а*) относительно медленно продвигается к скважине. Во втором случае начальное распределение концентрации адсорбированного кислорода неравномерное: у скважины концентрация выше, а по мере удаления от нее $C_{\bar{O}_2}(r, 0)$ уменьшается и при $r = r_f^*$ она равна нулю. В силу этого в сечении $r = r_f$ скорость реакции равна нулю и лишь по мере довольно быстрого продвижения фронта железистых подземных вод к скважине наблюдается постепенное зарождение реакции (рис. 21.7, *б*). Обращает на себя внимание тот факт, что несмотря на существенное различие в размерах зон «зарядки» пласта кислородом, в обоих случаях фронт железистых вод достигает скважины в один и тот же момент времени и далее происходит абсолютно синхронное повышение концентрации железа в отбираемой воде.

21.4. Натурные исследования по обезжелезиванию подземных вод в пласте

Методические указания по определению параметров процесса обезжелезивания. Для расчета установок обезжелезивания необходимо располагать данными по параметрам кинетики «зарядки»

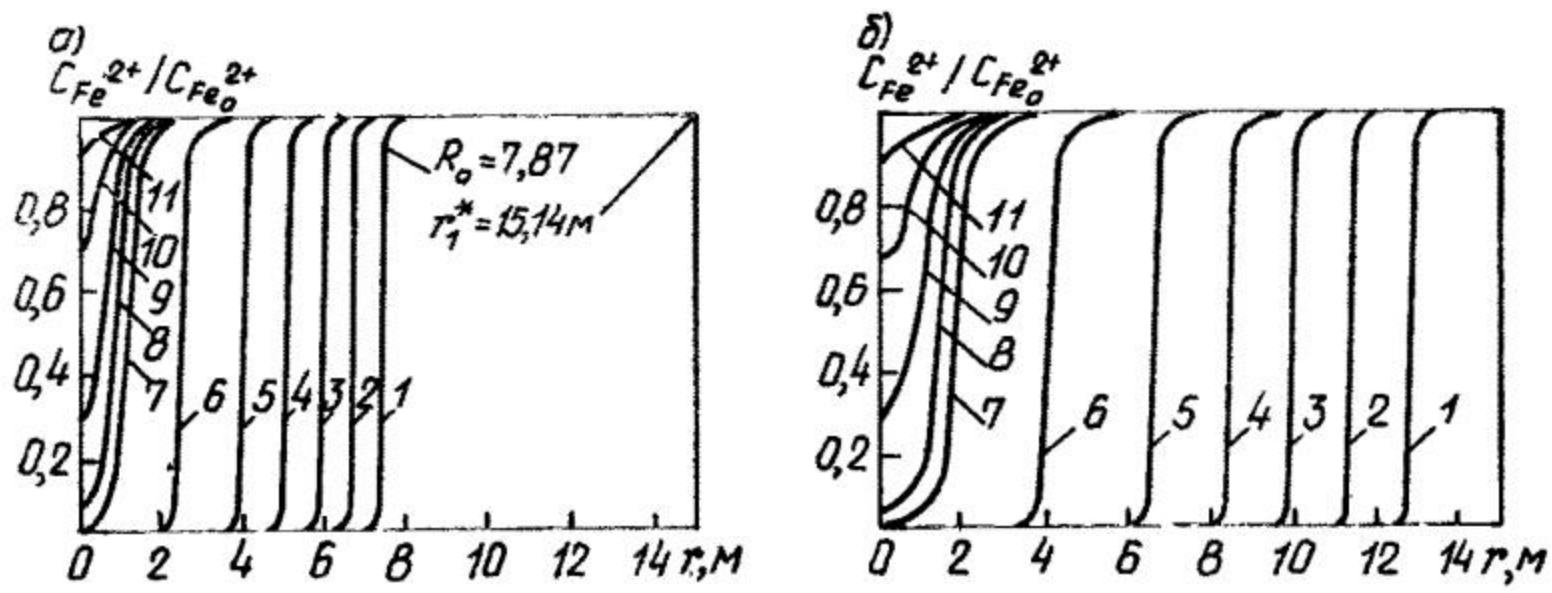


Рис. 21.7. Расчетные профили концентраций железа в зоне «зарядки»

а — случай необратимой мгновенной адсорбции кислорода; *б* — случай необратимой адсорбции кислорода по реакции 1-го порядка: *1* — $t=10$ сут; *2* — $t=20$ сут; *3* — $t=30$ сут; *4* — $t=40$ сут; *5* — $t=50$ сут; *6* — $t=60$ сут; *7* — $t=65$ сут; *8* — $t=65,5$ сут; *9* — $t=66$ сут; *10* — $t=66,5$ сут; *11* — $t=67$ сут

пласта кислородом и кинетики окисления Fe (II). Под этими параметрами подразумеваются величины Γ_{O_2} (константа Генри изотермы адсорбции O_2) или α_{O_2} (константа скорости адсорбции O_2) и $\sigma_{Fe^{2+}}$ (константа скорости окисления железа адсорбированным кислородом). Значения их зависят от целого ряда факторов и, в частности, от состава водовмещающих пород, геохимических условий (Eh, pH показателей среды, форм, в которых находится железо, и наличия в воде, а также на породах пласта веществ, ингибирующих или катализирующих процесс окисления железа) и т. п. Поэтому определять параметры процесса рекомендуется на основе обработки опытов по пробному обезжелезиванию воды в пласте, которые в свою очередь следует проводить непосредственно на скважинах, располагающихся на участке действующего или проектируемого водозабора (в последнем случае для этой цели могут использоваться разведочно-эксплуатационные скважины).

Перед началом опытных работ необходимо провести сбор и анализ имеющихся литературных и фондовых материалов о природных условиях района и, в частности, площадки водозабора, а также проектного решения по системе водоснабжения. При этом должны быть освещены следующие вопросы:

а) геологическое строение (стратиграфия, литология) и гидрогеологические условия района (глубина залегания водоносного пласта и характер его контакта с окружающими породами, состав водовмещающих пород и их фильтрационные параметры, условия питания подземных вод и взаимосвязь их с водами других горизонтов, а также поверхностными водоемами, режим подземных вод);

б) качество подземных вод эксплуатируемого горизонта (физические свойства, химический состав и Eh — pH-показатели воды);

в) характеристика водозабора (производительность системы водоснабжения, число скважин и схема их расположения, конст-

руктивные особенности скважин (глубина, тип фильтра и его длина), их производительность и техническое состояние на период сооружения (удельные дебиты скважин или показатели дополнительного сопротивления на несовершенство скважин), схема сбора и подачи воды от скважин, напоры воды в сборных водоводах.

Одновременно с этим проводится рекогносцировочное обследование системы водоснабжения; уточняются фактические дебиты скважин, определяются статические и динамические уровни воды в скважинах при нарушенном режиме, измеряются напоры воды в сборных водоводах. На основе этих данных принимается решение по обустройству установок обезжелезивания по той или иной схеме рис. 21.2. Обязательным при обследовании является проведение контрольных анализов воды на железо (и, по возможности, измерение Eh — pH).

При выполнении опытов по пробному обезжелезиванию в период закачки в пласт аэрированной воды производятся замеры $Q_з$ и $W_з = Q_з t_з$, а в период откачки измеряются расход и концентрация кислорода и железа в отбираемой воде на различные моменты времени. При этом откачка продолжается до полного восстановления исходных показателей качества подземной воды.

По завершении таких опытов получаются две информационные кривые: первая $C_{O_2}(t)$ отражает изменение концентрации кислорода в аэрированной воде, которая использовалась для «зарядки» пласта; вторая $C_{Fe^{2+}}(t)$ непосредственно характеризует эффективность процесса очистки подземных вод от железа.

Располагая данными об общем количестве поданного в пласт кислорода (оно равно $W_з C_{O_{2з}}$) и количестве кислорода, отобранного с водой из скважины, несложно рассчитать ту его часть, которая адсорбировалась на водовмещающих породах; более того, по выходной кривой $C_{O^2}(t)$ можно определить параметры адсорбции O_2. Однако в действительности не весь адсорбированный кислород является активным с точки зрения окисления железа и более того, часть его здесь также может расходоваться и на другие параллельно протекающие реакции. Поэтому все искомые параметры процесса определять по выходной кривой $C_{Fe^{2+}}(t)$.

Обработку опытных данных по $C_{Fe^{2+}}(t)$ рекомендуется проводить графоаналитически. Для этого на основе выходной кривой $C_{Fe^{2+}} - t$ (рис. 21.8, *а*) строится вспомогательный график (рис. 21.8, *б*), где по оси ординат откладываются экспериментальные значения $\ln(C_{Fe_0^{2+}}/C_{Fe^{2+}} - 1)$, а по оси абсцисс — $\beta C_{Fe_0^{2+}}(t - t_0^*)$. В этом случае величина $\sigma_{Fe^{2+}}$ определяется по наклону линии, проведенной через опытные точки, к оси ординат ($\sigma_{Fe^{2+}} = Д/\Delta$), а параметр $\bar{\xi}$ рассчитывается по формуле

$$\xi = \frac{Q_0 Д}{W_з \sigma_{Fe^{2+}}} \ln[\exp Д + 1], \qquad (21.42)$$

где Д — отрезок, отсекаемый на оси ординат.

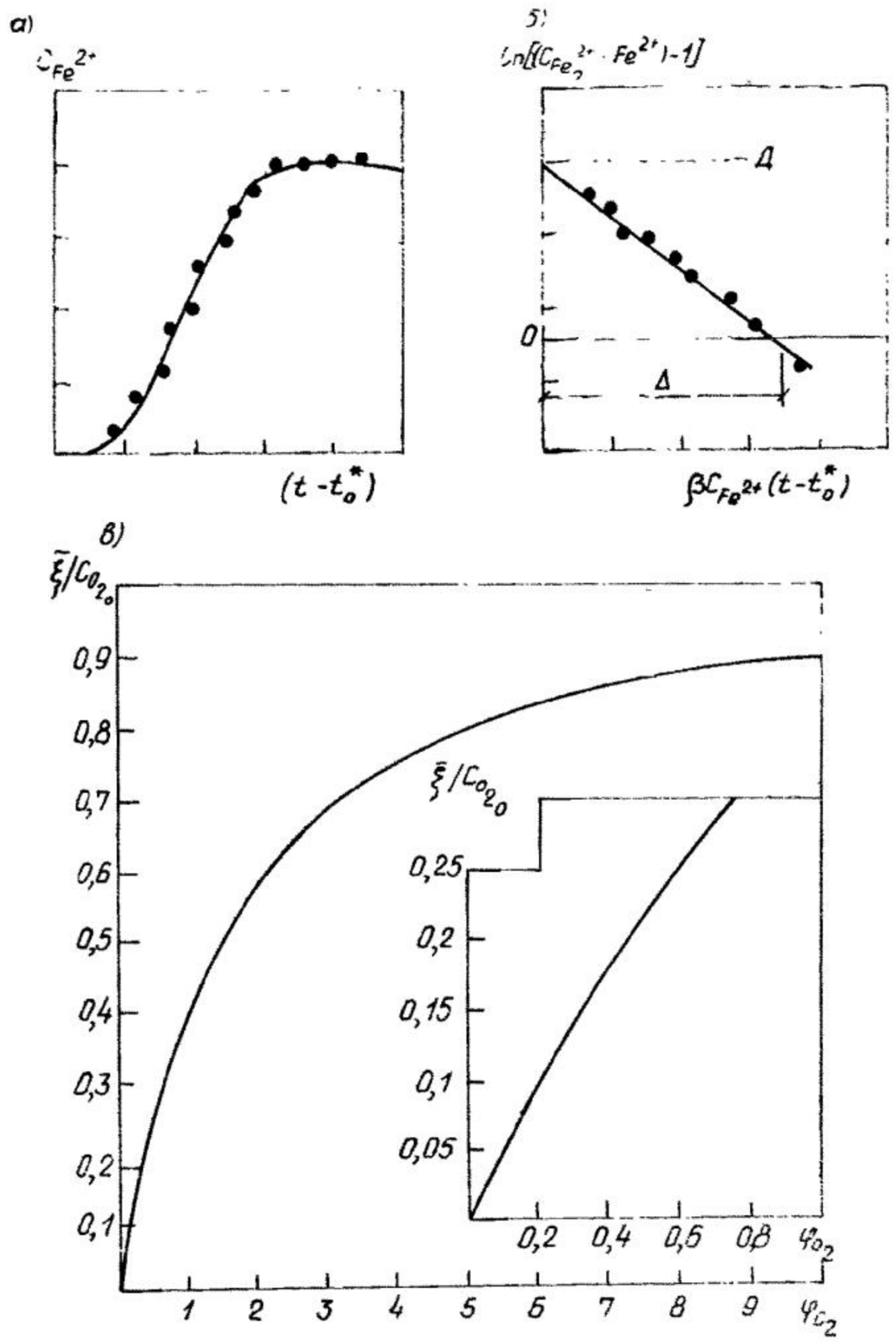


Рис. 21.8. Графоаналитический метод определения параметров процесса

а — график выходной кривой $C_{Fe^{2+}}$; *б* — вспомогательный график; *в* — график функции $\bar{\xi}/C_{O_2}=f(\varphi_{O_2})$

В автомодельной области обычно выполняется условие $Д \gg 1$ и поэтому вместо (21.42) можно использовать более простую зависимость

$$\bar{\xi} = Q_0 Д / W_3 \sigma_{Fe^{2+}}. \qquad (21.43)$$

При необратимой мгновенной адсорбции кислорода $\bar{\xi}$ определяется согласно (21.11). Следовательно, при известных $\bar{\xi}$, $C_{O_{2_0}}$

и n_0 имеем $\Gamma_{O_2}=n_0\bar{\xi}/(C_{O_{2_0}}+\bar{\xi})$. В случае необратимой неравновесной адсорбции кислорода проводится расчет коэффициента α_{O_2}. Для определения α_{O_2} имеем

$$\bar{\xi}/C_{O_2}=1-\varphi_{O_2}^{-1}[1-\exp(-\varphi_{O_2})]. \qquad (21.44)$$

Зная $\bar{\xi}$ и $C_{O_{2_0}}$, на основе (21.44) вычисляется φ_{O_2} (для удобства определения φ_{O_2} можно использовать график, представленный на рис. 21.8, *в*), а далее рассчитывается

$$\alpha_{O_2}/n_0=\varphi_{O_2}Q_0/t_з(Q_0+Q_з). \qquad (21.45)$$

и при известном n_0 находится α_{O_2}.

Опыты по обезжелезиванию подземных вод в пласте. Определение параметров процесса обезжелезивания подземных вод в пласте является новым видом гидрогеологических работ, которые пока еще не получили достаточного обоснования.

Опыты по обезжелезиванию подземных вод проводились на промышленных установках в различных гидрогеологических и гидрохимических условиях.

Водозабор «Гауя-Э» (ЛатвССР) инфильтрационного типа располагается в излучине р. Гауя на ее правом берегу. Он представлен 14 водозаборными скважинами, сооруженными на расстоянии 80—100 м от линии берегового уреза; расстояние между скважинами в ряду 50 м. Подземные воды на участке водозабора залегают на глубине 2—7 м от поверхности земли и приурочены они к аллювиальным отложениям из средне- и крупнозернистого песка. Мощность обводненной толщи колеблется от 14 до 27 м. Коэффициент водопроводимости $kM=400-600$ м²/сут. В основании пласта залегают слабопроницаемые глины, а сверху он перекрыт неоднородными по литологическому составу породами (почвенно-растительный слой имеет мощность порядка 0,2—0,5 м; ниже находятся тонко- и мелкозернистые пески, включающие маломощные прослои глин со значительным содержанием солей железа и органического материала).

По химическому составу подземные воды относятся к гидрокарбонатно-кальциевому типу и имеют незначительную минерализацию. Щелочность воды колеблется в пределах 3,2—4 мг-экв/л, окисляемость изменяется от 5 до 7 мг/л O_2 и pH составляет 6,4—6,8. Температура подземных вод относительно постоянная; в зимнее время $t=7°$ С, а в летнее $t=9°$ С. Характерным для подземных вод является повышенное содержание железа (по отдельным скважинам) и марганца. Обычно пиковые концентрации железа до 2 мг/л отмечаются со 2-го по 4-й и с 9-го по 11-й месяцы, когда выпадает бóльшая часть атмосферных осадков (по-видимому, связано это с выщелачиванием железистых соединений из зоны аэрации); в остальное время содержание железа в воде колеблется в пределах 0,5—1 мг/л.

Водозабор «Гауя-Э» введен в действие в ноябре 1964 г. Первоначально все скважины были пробурены ударно-канатным способом на глубину 24—34 м и оборудованы фильтрами из пористой керамики на трубчатых перфорированных каркасах длиной $l_ф = 14$ м. В начальный период эксплуатации производительность водозабора составляла $Q_s = 14$ тыс. м³/сут. Затем в результате интенсивного кольматажа фильтров скважин железистыми осадками она резко снизилась и к 1968 г. составила порядка 5—6 тыс. м³/сут. В 1969 г. часть скважин водозабора (начиная с 6-й по 14-ю) были перебурена. Эти дублирующие скважины сооружены на расстояниях 4,5—5,5 м от ранее построенных; оборудованы они каркасно-стержневыми фильтрами с проволочной обмоткой и гравийной обсыпкой. С 1970 г. водозабор «Гауя-Э» эксплуатировался при среднесуточной подаче в 10—12 тыс. м³, а в 1978 г. он был законсервирован. Причиной этому явилась необходимость строительства станции обезжелезивания.

По существующей схеме вода, поступающая от скважин в сборный водовод под напором в 50—60 м, далее по магистральному трубопроводу длиной 22 км подается непосредственно в городскую водопроводную сеть. Сооружение же станции обезжелезивания предполагает устройство на площадке водозабора дополнительно сборного резервуара и насосной станции второго подъема.

В 1980 г. на водозаборе «Гауя-Э» был организован опытный стационар для проведения исследований и отработки различных технологических приемов по регулированию качества подземных вод в пласте.

На четырех скважинах водозабора (№ 5—7, 9) проводились опыты по обезжелезиванию подземных вод в пласте на установках циклического типа. Ниже приведены исходные показатели качества воды, отбираемой из этих скважин, а также равновесные концентрации, рассчитанные по уравнению

$$Eh = 0{,}996 - 0{,}178\ pH - 0{,}0952 \lg \left[\frac{C_{Fe^{2+}} \gamma_{Fe^{2+}}}{55{,}85} 10^{-3} \right]$$

для реакции $Fe^{2+} + 3OH^- = Fe(OH)_3 + \bar{e}$.

	Номер скважины			
	5	6	7	9
Щелочность, мг-экв/л	3,6	3,8	3,2	3,5
Окисляемость, мг/л O_2	5,2	5,8	6,1	5,3
Сухой остаток. P_c, мг/л:	230	242	225	238
pH	6,5	6,8	6,6	6,5
Eh(b)	0,11	0,06	0,1	0,13
Железо, мг/л:				
по химическому анализу	2,08	1,55	1,04	0,9
расчетное	1,84	1,4	1,22	0,85

Поскольку общее солесодержание подземных вод невелико, то при выполнении термодинамических расчетов ионная сила раство-

ра принималась равной: $I = 0{,}000022 P_c$, а коэффициент активности ионов определялся по формуле $\lg \nu_{Fe^{2+}} = -0{,}5 z_i^2 \sqrt{I}$ (где z_i — заряд ионов Fe^{2+}). По исходным показателям качества воды видно, что концентрации Fe^{2+}, установленные на основе химических анализов, достаточно хорошо согласуются с расчетными. Это свидетельствует о том, что система находится в положении, близком к термодинамическому равновесию, и содержание железа (II) в подземных водах водозабора контролируется образованием (или растворением и восстановлением) $Fe(OH)_3$. Следовательно, в данных условиях, повышая Eh — pH воды, можно рассчитывать на полное окисление и осаждение железа в пласте.

Для отработки технологии все опытные скважины были предварительно переоборудованы под установки для обезжелезивания подземных вод в пласте в соответствии со схемой рис. 21.2, *а*. Условия, при которых выполнялись опыты по пробному обезжелезиванию, приведены в табл. 21.1.

На скважинах № 5, 6 и 7, где расходы откачки Q_0 были достаточно большими, проведено по два опытных цикла; полученные при этом данные по изменению содержания кислорода в откачиваемой воде сведены в табл. 21.2, а выходные кривые по Fe^{2+} показаны на рис. 21.9. На скважине № 9 опыт проводился с малым расходом откачки и был выполнен лишь один полный цикл.

Таблица 21.1. Условия проведения опытов и результирующие значения параметров процесса

Номер скважины	Циклы	$Q_з$, м³/ч	$t_з$, ч	$W_з$, м³	Q_0, м³/ч	$C_{O_2 0}$ мг/л	$\sigma_{Fe^{2+}}$, (мг·ч/л)⁻¹	$\bar{\xi}$, мг/л	$\alpha_{O_2} \cdot 10^3$ ч⁻¹
5	1	18	20	360	75	12,8	0,147	2,83	5,26
	2	16,6	22,5	373,5	75	11,9	0,147	2,83	5,18
							$\sigma^*_{Fe^{2+}} = 0{,}147$		$\alpha^*_{O_2} = 0{,}00522$
6	1	17,6	23,5	413,6	78	10,8	0,396	1,37	2,41
	2	20,8	34	707,2	78	6	0,405	1,11	2,45
							$\sigma^*_{Fe^{2+}} = 0{,}400$		$\alpha^*_{O_2} = 0{,}00243$
7	1	21,75	24	522	85	12,5	0,402	0,95	1,33
	2	21,95	38	834,1	85	8,9	0,404	1,06	1,36
							$\sigma^*_{Fe^{2+}} = 0{,}403$		$\alpha^*_{O_2} = 0{,}00135$
9	1	14,68	23,5	345	30	11,4	0,359	2,35	3,43

* Средние значения параметров.

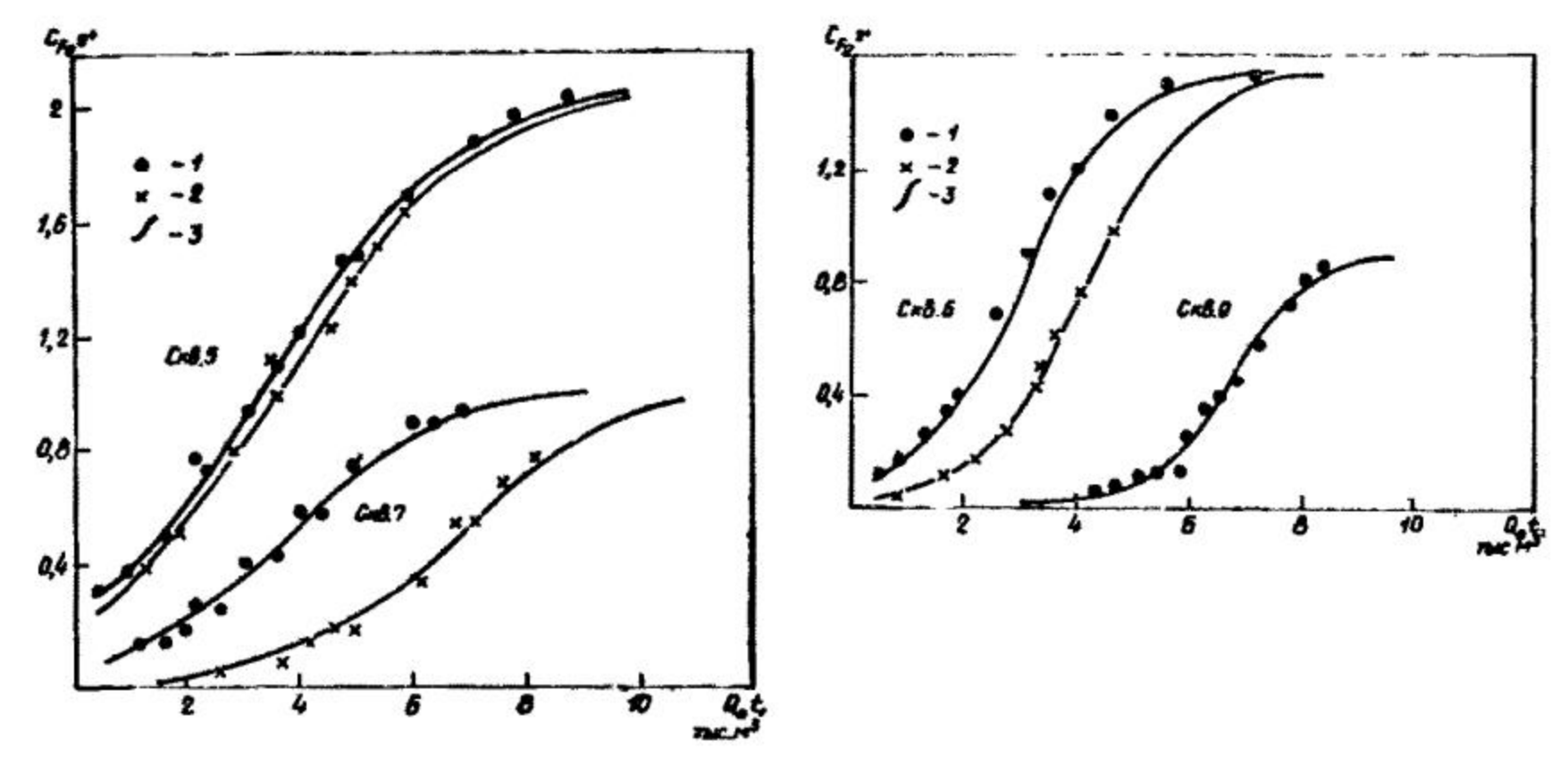


Рис. 21.9. Выходные кривые

1 — 1-й цикл; *2* — 2-й цикл; *3* — расчетные кривые

Таблица 21.2. Данные по изменению концентрации кислорода, мг/л, в откачиваемой воде на первом цикле работы установок

t, ч	Номер скважины		
	5	6	7
0	12,8	10,8	12,5
0,5	10,1	—	—
1	8,6	7,8	11,3
1,5	7,3	—	10,8
2	5,3	5,8	10,2
2,5	4,7	4,8	—
3	3,2	4,2	—
3,5	3,0	—	8,8
4	2,6	2,8	—
4,5	—	2,6	—
5	—	—	7,6
5,5	0,9	—	—
6	—	—	6,6
φ_{O_2}/t_0^*	0,41	0,32	0,1
ξ_{O_2}	7,22	5,6	3,1

Обработка выходных кривых по Fe^{2+} выполнялась в соответствии с рекомендациями (см. с. 230).

На скважине № 5 оба опытных цикла выполнялись в одинаковых условиях (т. е. при одних и тех же объемах $W_з$ аэрированной воды и неизменной концентрации кислорода); на скважинах № 6 и 7 условия различались (на втором цикле объем закачки был примерно в 1,6—1,7 раза больше, чем на первом, а концентрация

кислорода, наоборот, несколько занижена). Из табл. 21.1 видно, что найденные по двум опытам для каждой скважины значения параметров $\sigma_{Fe^{2+}}$ и α_{O_2}/n_0 оказались примерно равными. Это в первую очередь свидетельствует о том, что водовмещающие породы представлены достаточно однородными песками и поэтому увеличение радиуса зоны «зарядки» пласта здесь практически не сказывается на значениях $\sigma_{Fe^{2+}}$ и α_{O_2}/n_0; с другой стороны, из сопоставления экспериментальных и расчетных выходных кривых (см. рис. 21.9) следует, что предлагаемая математическая модель достаточно хорошо отражает влияние на процесс входных параметров, таких, как $Q_з$, $t_з$, Q_0, $C_{O_{2_0}}$, $C_{Fe_0^{2+}}$.

Остановимся теперь на вопросе о соотношении между общим количеством кислорода, адсорбированного на породах пласта, и тем, которое пошло непосредственно на окисление железа.

В опытах на водозаборе «Гауя-Э» откачка производилась практически до полного восстановления исходного качества воды. Поэтому количество железа, осажденное в пласте за один цикл работы установки, может быть рассчитано по формуле

$$P_{Fe(OH)_3} = Q_0 \int_{t_0^*}^{\infty} (C_{Fe_0^{2+}} - C_{Fe^{2+}})\, dt.$$

Подставляя (21.37) при T_0', определяемом согласно (21.41), получим $P_{Fe(OH)_3} = Q_з t_з \bar{\xi}/\beta$; при этом количество кислорода, затраченное на окисление железа, составляет $P_{O_2}^* = \beta P_{Fe(OH)_3} = Q_з t_з \bar{\xi}$. Естественно, что при расчете $P_{Fe(OH)_3}$ и соответственно $P_{O_2}^*$, параметр $\bar{\xi}$ должен определяться на основе обработки выходных кривых по Fe^{2+} (поэтому здесь $\bar{\xi} = \bar{\xi}_{Fe^{2+}}$ и значения $\bar{\xi}_{Fe^{2+}}$ следует принимать по табл. 21.1).

Общее количество кислорода, осажденное в пласте, также рассчитывается по формуле $P_{O_2} = Q_з t_з \bar{\xi}$, но при этом $\bar{\xi}$ принимается равным ξ_{O_2}, а последний определяется на основе обработки выходных кривых по O_2 (табл. 21.2) с использованием зависимости (21.19). Значения $\varphi_{O_2}/t^*_{O_2}$, снятые с линеаризованных графиков $\ln(C_{O_{2_0}}/C_{O_2} - t)$ и рассчитанные по формуле (21.21) $\bar{\xi} = \bar{\xi}_{O_2}$, приведены в табл. 21.2.

Как видно, значения $\bar{\xi}_{O_2}$ (табл. 21.2) примерно в 2—4 раза превышают $\bar{\xi}_{Fe^{2+}}$ (табл. 21.1) и соответственно в данном случае $P_{Fe(OH)_3} = (0{,}25—0{,}5)\, P^*_{O_2}$. Это свидетельствует о том, что далеко не весь осажденный в пласте кислород принимает участие в окислении железа; часть его расходуется на другие побочные реакции.

Курманкеевский водозабор (г. Давлеканово, БашАССР) размещается на первой надпойменной террасе левого берега р. Демы (между рекой и старичным озером Япрык). Подземные воды приурочены к аллювиальным песчано-гравийно-галечным отложениям четвертичного возраста. Мощность обводненной толщи отложений

в пределах водозабора колеблется от 4 до 12 м; коэффициент фильтрации пород $k=70—80$ м/сут. В основании пласта находятся сильно загипсованные глины уфимского яруса; сверху он перекрыт тонко- и мелкозернистыми песками с прослоями и линзами из глин и суглинков.

По химическому составу подземные воды относятся к сульфатно-гидрокарбонатно-кальциевому типу и имеют минерализацию порядка 1—1,5 г/л. Общая жесткость воды колеблется от 10 до 15 мг-экв/л. Помимо этого отмечается также и высокое содержание в воде железа (до 1—2 мг/л) и сероводорода (от 0,3 до 1 мг/л).

Режим подземных вод тесно связан с режимом р. Дема. При этом непостоянным в течение года является и химический состав воды.

На водозаборе работает 9 скважин, обеспечивающих подачу воды в количестве $Q_s=2,5—3$ тыс. м³/сут; при этом скважины № 1, 3, 4, 10 и 13 эксплуатируются при $Q_i \approx 14—16$ м³/ч, а остальные при $Q \approx 7—8$ м³/ч. Расположение скважин линейное; расстояние между ними по 40—80 м. При этом все они устроены в насыпях высотой 2,5—3 м, предотвращающих их затопление в период паводка.

Опыты по обезжелезиванию подземных вод в пласте здесь проводились на скважинах № 3 и 4. Кривая, иллюстрирующая кинетику окисления железа (II) в свободном объеме, показана на рис. 21.10. Этот опыт проводился на скважине № 3 при поддержании постоянной температуры воды; концентрация растворенного в воде кислорода составляла 7—8 мг/л. Как видно (рис. 21.5), добиться полного окисления железа (II) в таких условиях не удается; через 6 ч концентрация железа (II) снизилась (на 50—60 %) до 0,5 мг/л, а в дальнейшем уже практически не изменялась.

С целью оценки эффекта катализа при обезжелезивании воды в пласте на скважине № 3 было первоначально выполнено три пробных цикла. Во всех случаях закачка в пласт аэрированной воды проводилась с расходом $Q_з=10$ м³/ч в течение $t_з=6$ ч при $C_{O_{2_0}}=10$ мг/л; расход откачки составлял $Q_0=16$ м³/ч. Полученные при этом результаты приведены на рис. 21.11.

Из него видно, что уже на первом цикле откачки к моменту отбора из скважины всей поданной в пласт воды концентрация железа (II) снизилась до 0,3 мг/л. Это свидетельствует о том, что скорость окисления железа (II) в пласте выше, чем в свободном объеме. С другой стороны, здесь явно прослеживается эффект катализа; по мере повторения циклов «закачка-откачка» повышается реакционная способность пласта. При этом, если сопоставить выходные кривые рис. 21.11 с эталонными, то становится очевидным, что в первую очередь эффективность очистки возрастет за счет повышения нормы адсорбции кислорода (увеличивается X_0).

Для оценки параметров процесса обезжелезивания воды в пласте опыты проводились на скважине № 3 и при $W_з=220$ м³ ($Q_з=$

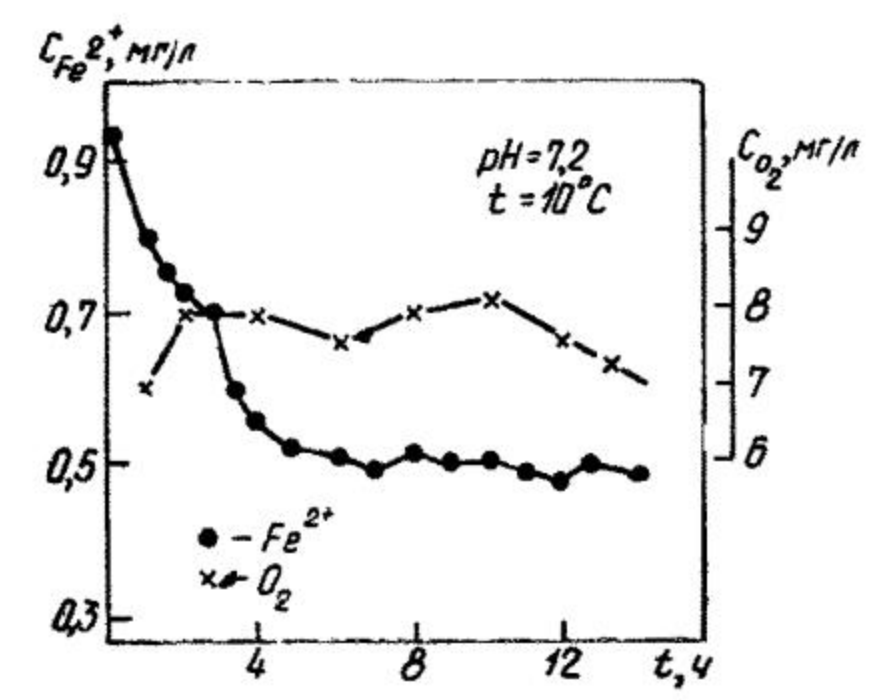


Рис. 21.10. Кривые окисления железа в свободном объеме

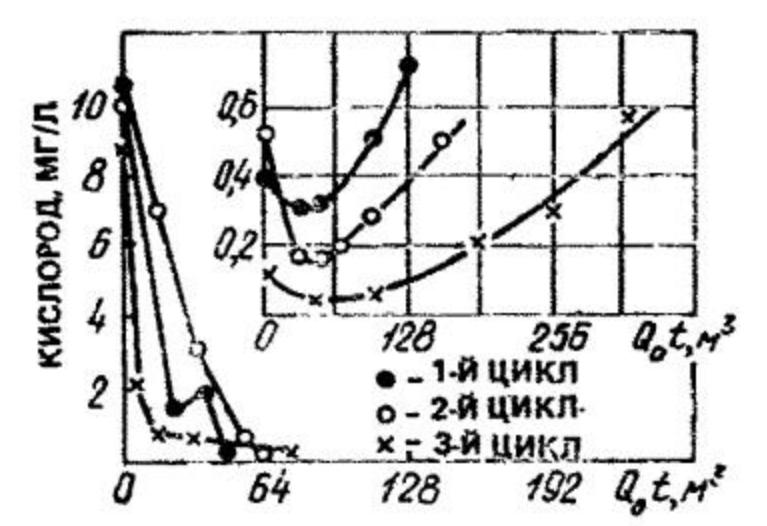
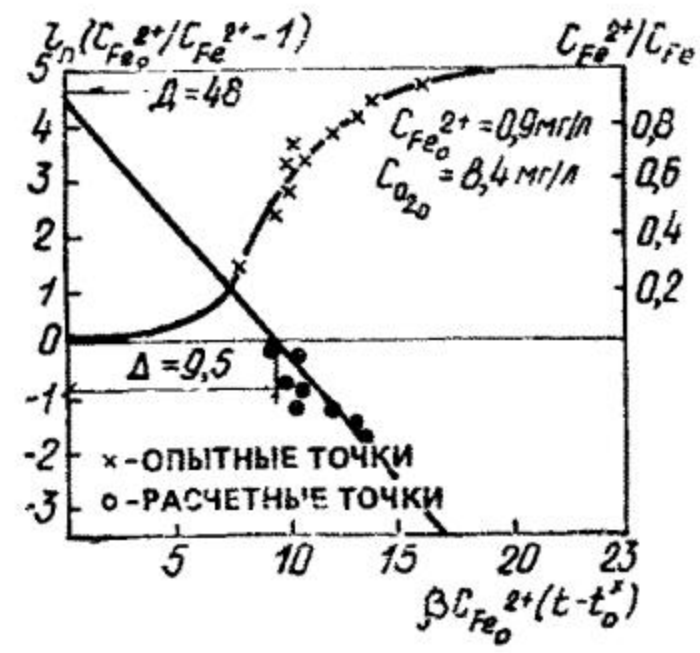


Рис. 21.11. Изменение концентрации C_{O_2} и $C_{Fe^{2+}}$ в откачиваемой воде (скважина № 3)

Рис. 21.12. Выходная кривая $C_{Fe^{2+}}/C_{Fe_0^{2+}}$ по скважине № 3 и вспомогательный график для расчета параметров процесса



$=10$ м³/ч, $t_з=22$ ч). Расход откачки составлял $Q_0=16$ м³/ч. Результирующие выходные кривые по железу, а также вспомогательные графики для расчета параметров процесса представлены на рис. 21.12. На основе обработки опытных данных установлены следующие значения коэффициентов: $\sigma_{Fe^{2+}}=0{,}5$ (мг·ч/л)$^{-1}$, $\alpha_{O_2}/n_0=0{,}0049$ ч$^{-1}$.

Водозаборы г. Бреста (БССР) базируются на использовании подземных вод, приуроченных к сеноманским отложениям верхнего мела, представленным мелкозернистыми глауконитовыми песками. Мощность водоносного пласта колеблется от 30 до 50 м; коэффициент водопроводимости $kM\approx200$ м²/сут. Подстилаются сеноманские пески оксфордскими слаботрещиноватыми известняками. Кровля пласта представлена мергельно-меловой толщей, а также четвертичными и палеоген-неогеновыми отложениями из разнозернистых песков и моренных супесей и суглинков.

В химическом отношении воды сеноманского горизонта классифицируются как гидрокарбонатно-кальциевые. Они имеют минерализацию порядка 0,4 г/л, щелочность 2,5—3 мг-экв/л, $t=8°$ С и по всем показателям, за исключением высокого содержания железа (до 2—3 мг/л), соответствуют требованиям ГОСТ 2874—82.

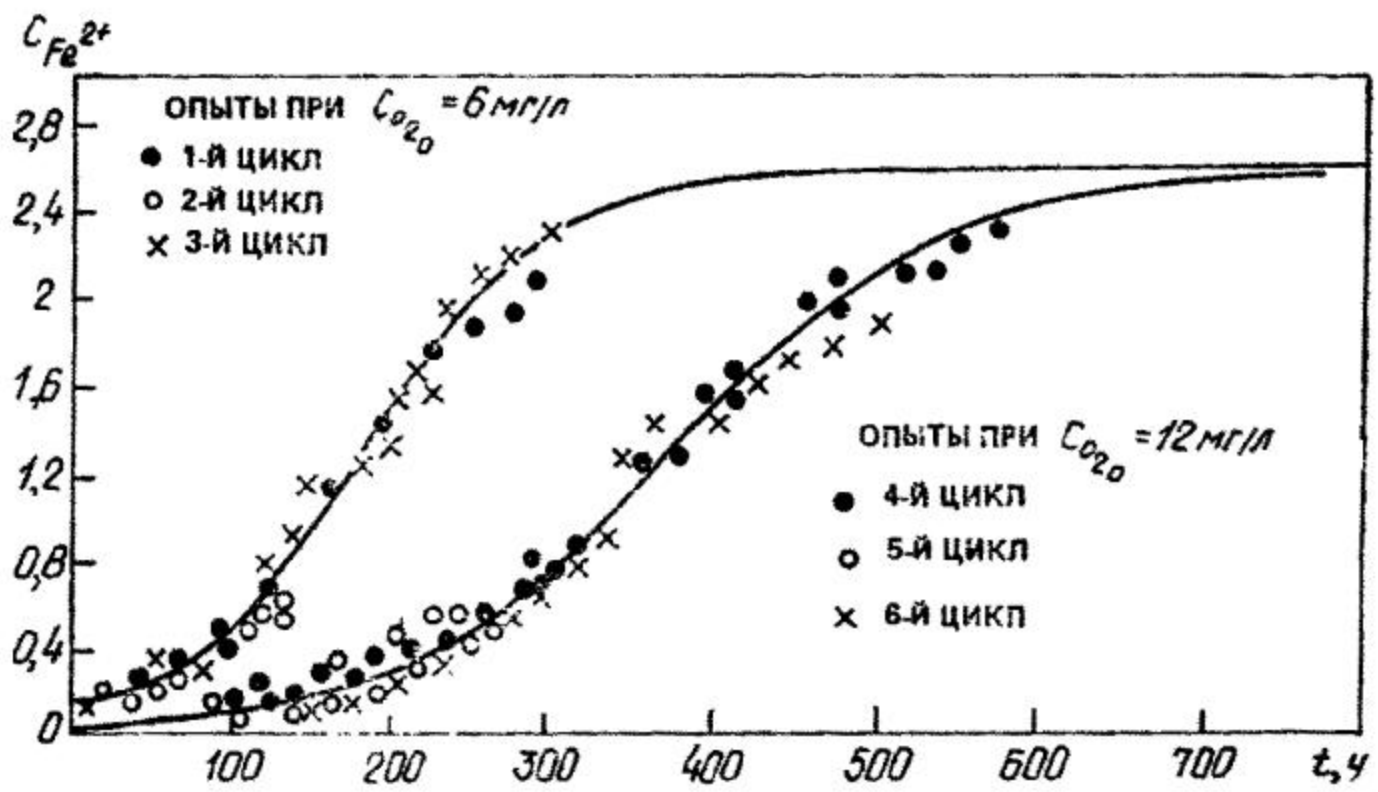


Рис. 21.13. Выходные кривые при многократной циклической эксплуатации установки обезжелезивания (водозабор «Парк Свободы», скв. № 8)

Полевые эксперименты проводили на водозаборе «Парк Свободы» на скважине № 8, обустроенной по схеме рис. 22.2, *а*. Здесь выполнено шесть опытных циклов при промышленных объемах закачки в пласт аэрированной воды. Закачку проводили с постоянным расходом $Q_з = 45$ м³/ч, в течение 1 сут (т. е. $t_з = 24$ ч), так что $W_з = 1000$ м³; расход откачки составлял $Q_0 = 45$ м³/ч.

Методика работы состояла в следующем. На первом, третьем, четвертом и шестом циклах работы установки вода отбиралась из скважины в течение отрезка времени, необходимого на восстановление Fe^{2+} до исходного его содержания в пластовой воде; на втором и пятом циклах откачку прекращали, когда Fe^{2+} составляло 0,5 мг/л. При этом в первых трех циклах концентрация кислорода в закачиваемой воде поддерживалась постоянной и равной 6—7 мг/л, а на последующих трех циклах она составляла 10—12 мг/л.

Результаты опытов представлены на рис. 21.13. Обработка выходных кривых проводилась по описанной выше методике. Искомые значения параметров процесса приведены в табл. 21.3. Из выходных кривых рис. 21.13 видно, что прекращение откачки на втором и пятом циклах работы установки при низком содержании железа (0,5 мг/л против исходного 2,6 мг/л) не оказывало практически никакого влияния на дальнейший ход процесса, поэтому значения $\sigma_{Fe^{2+}}$ и ξ, найденные для первого, третьего и соответственно четвертого и шестого циклов, оказались равными. С другой стороны, обращает на себя внимание тот факт, что расчетные значения ξ четко реагируют на изменения концентрации кислорода в питательной воде: при увеличении $C_{O_2 0}$ в два раза (с 6 мг/л на первых циклах до 12 мг/л на последующих трех циклах), также увеличиваются вдвое (см. табл. 21.3).

Таблица 21.3. Расчетные значения параметров процесса (скважина № 8 водозабора «Парк Свободы»)

Номер цикла	C_{O_2}, мг/л	$\sigma_{Fe^{2+}}$, (мг·ч/л)$^{-1}$	$\bar{\xi}$, мг/л
1 3	6,1 5,9	0,046 0,048 $\sigma_{Fe^{2+}} = 0,047$	3,1 3,01 $\bar{\xi}=3,05$
4 6	11,5 12,8	0,036 0,028 $\sigma_{Fe^{2+}} = 0,032$	6,22 6,18 $\bar{\xi}=6,2$

Водозаборы на швентойско-тартуском водоносном комплексе (ЛатвССР). Комплекс представлен континентальными и прибрежно-морскими отложениями, состоящими из чередующихся слоев песчаных, алевритовых и глинистых пород, и содержит в основном пресные воды (с минерализацией 0,3—0,9 г/л). От залегающего ниже донаровского горизонта (воды которого относятся к хлоридно-сульфатно-кальциево-натриевому типу и имеют повышенную минерализацию) он отделен мощной толщей до 100—130 м наровских отложений, а от залегающего выше саргаевского горизонта (содержащего минерализованные сульфатно-кальциевые воды) — пачкой глин и глинистых мергелей.

На отдельных участках распространения швентойско-тартуского комплекса выделяются два водоносных горизонта: швентойский (залегающий выше) и тартуский, разделенные между собой слоистой водоупорной пачкой глин и глинистых алевролитов общей мощностью от 10 до 60 м.

В составе швентойского горизонта выделяются аматские (залегающие выше) и гауйские водоносные слои, различающиеся по зерновому составу слагающих их песчаников и песков. Аматские слои сложены преимущественно тонкозернистыми слабосцементированными песчаниками и содержат значительное количество глин и алевролитов (до 35%); гауйские слои представлены мелко- и среднезернистыми песчаниками и содержат меньшее количество глин (до 15 %). Общая мощность швентойского горизонта достигает 170 м. Воды, приуроченные к этим отложениям, пресные и главным образом гидрокарбонатно-кальциево-магниевые и лишь там, где прослеживается гидравлическая связь швентойского и саргаевского горизонтов, отмечается повышение минерализации и смена химического состава воды (она становится сульфатно-кальциевой или сульфатно-кальциево-магниевой).

Исследования по обезжелезиванию подземных вод в пласте выполнялись на трех действующих системах водоснабжения: это водозабор г. Цесиса, водозабор поселка Саласпилс (Рижский район) и водозабор г. Юрмалы.

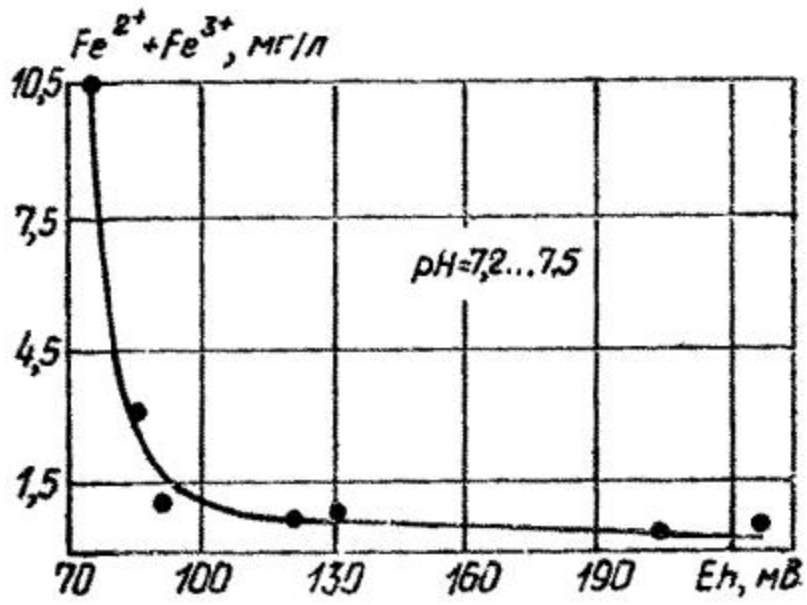


Рис. 21.14. Зависимость Eh от содержания железа в водах гауйского горизонта

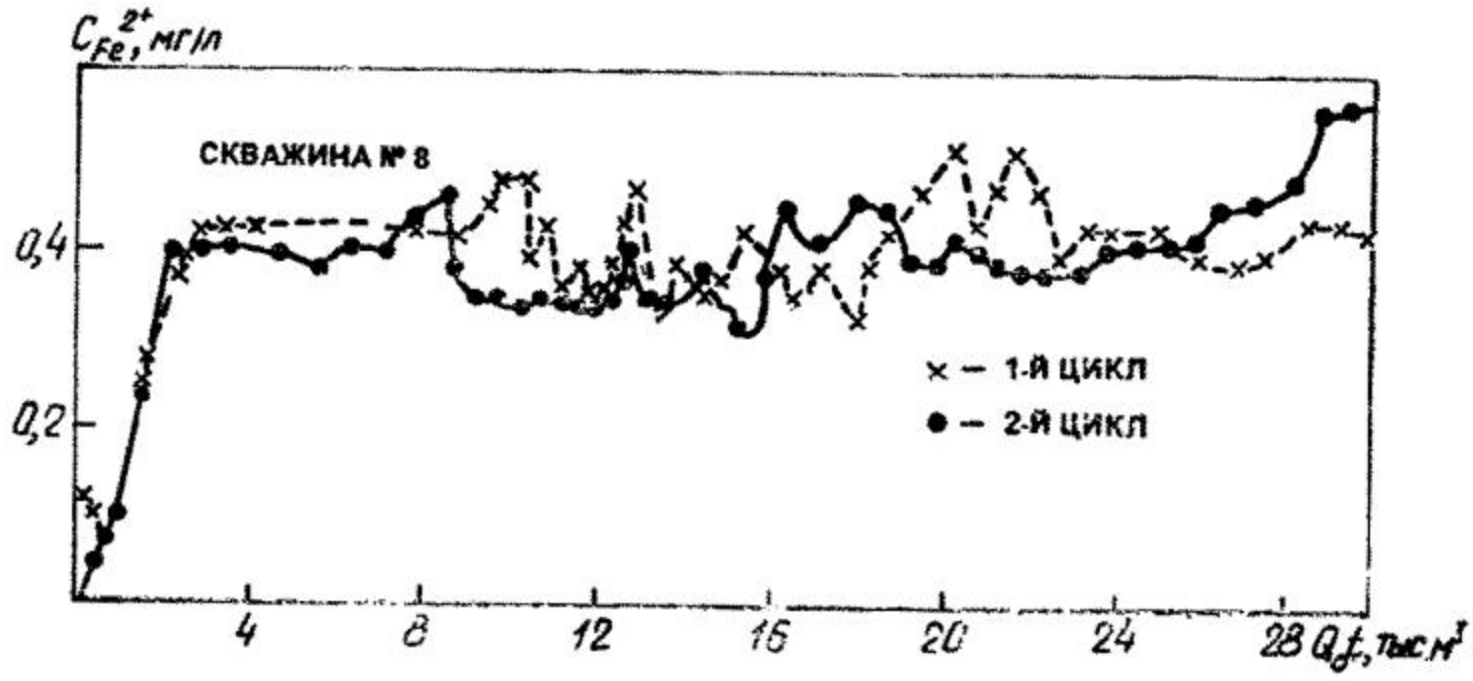


Рис. 21.15. Выходные кривые

Водозабор г. Цесиса (ЛатвССР) расположен на подпойменной террасе левого берега р. Гауя. Он представлен скважинами, которые раздельно эксплуатируют два водоносных горизонта: швентойский (гауйские слои) и подземные воды, приуроченные к нерасчлененным аллювиальным отложениям р. Гауя.

Исследования по обезжелезиванию проводились на скважинах, каптирующих воды гауйских отложений. В районе водозабора этот горизонт залегает на глубине 100—140 м и имеет мощность порядка 30—40 м. Сверху и снизу он ограничен слоями слабопроницаемых глин и глинистых алевролитов. Подземные воды гауйских отложений напорные. При этом в силу того, что сама площадка водозабора находится на пониженных отметках (и ниже городской территории примерно на 80—90 м), скважины самоизливающиеся; напор на устье скважин при их остановке составляет 10—15 м.

Подземные воды пресные гидрокарбонатно-кальциевые с минерализацией 0,3—0,5 мг/л. Они характеризуются следующими показателями: щелочность 6,6—6,7 мг-экв/л, окисляемость 6—8 мг/л O_2, pH$\approx$7,2—7,4, Eh$\approx$80—130 мВ. В условиях равновесия в системе гауйские терригенные отложения — подземные воды прослеживается связь (рис. 21.14) между Eh и содержанием железа. В целом же для подземных вод характерно наличие железа (II) в количестве от 1 до 3 мг/л.

Опыты по обезжелезиванию воды в пласте на скважине № 8 представлены на рис. 21.15. Условия, при которых они выполнялись, а также данные других опытов представлены в табл. 21.4. Данные свидетельствуют о том, что при создании в терригенных отложениях швентойского комплекса искусственных геохимических барьеров происходит достаточно эффективная очистка воды в пласте.

При построении модели, описывающей процесс очистки воды в пласте, предполагалось, что может быть окислено все железо. Если же учесть отмеченное выше обстоятельство, то выражение для скорости реакции следует записать в виде $\sigma_{Fe^{2+}}(C_{Fe^{2+}} - C^*_{Fe^{2+}})C_{O_2}$, где $C^*_{Fe^{2+}}$ — концентрация труднооокисляемых соединений железа. При этом

$$C_{Fe^{2+}}/C_{Fe_0^{2+}} = \overline{C}_\Delta + (1 - \overline{C}_\Delta) \cdot \frac{\exp[(1 - \overline{C}_\Delta)T]}{\exp[(1 - C_\Delta)T + \exp(X_0) - 1]}, \quad (21.46)$$

где

$$\overline{C}_\Delta = C^*_{Fe^{2+}}/C_{Fe_0^{2+}}.$$

Выходные кривые $C_{Fe^{2+}}/C_{Fe_0^{2+}}$, рассчитанные по формуле (22.45) при $X_0=3$, для различных значений $\overline{C}_\Delta$ представлены на рис. 21.16.

Таблица 21.4. Значения параметров при проведении опытов

Номер скважины	Номер цикла	Исходное содержание железа, мг/л	$Q_з$, м³/ч	$t_з$, ч	Q_0, м³/ч	$C_{O_{20}}$, мг/л
8	1	1,4	8,5	120	30	—
	2	1,3	8,5	120	30	—
9	1	1	2,2	47,5	30	—
10	1	2,4	6,4	93,5	30	28
12	1	2,6	10	90	30	14,6
	2	1,6	24,2	163	30	—
13	1	1	10	80	30	—
	2	1	19	186	30	4,3
14	1	1	10,4	98	30	—
	2	1	10,4	98	30	—

Обработка опытных данных выполнялась по зависимости (21.46). Полученные при этом вспомогательные графики показаны на рис. 21.17, а расчетные значения параметров сведены в табл. 21.5.

Водоснабжение г. Юрмалы полностью основано на использовании подземных вод швентойского горизонта. Здесь действуют централизованные водозаборы; помимо этого, в эксплуатации находятся еще 7 скважин, размещенных на территории города, вода

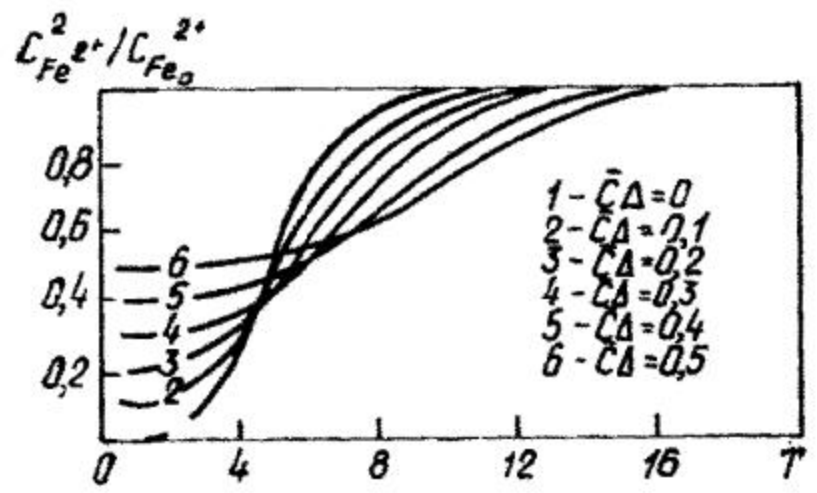


Рис. 21.16. Расчетные выходные кривые

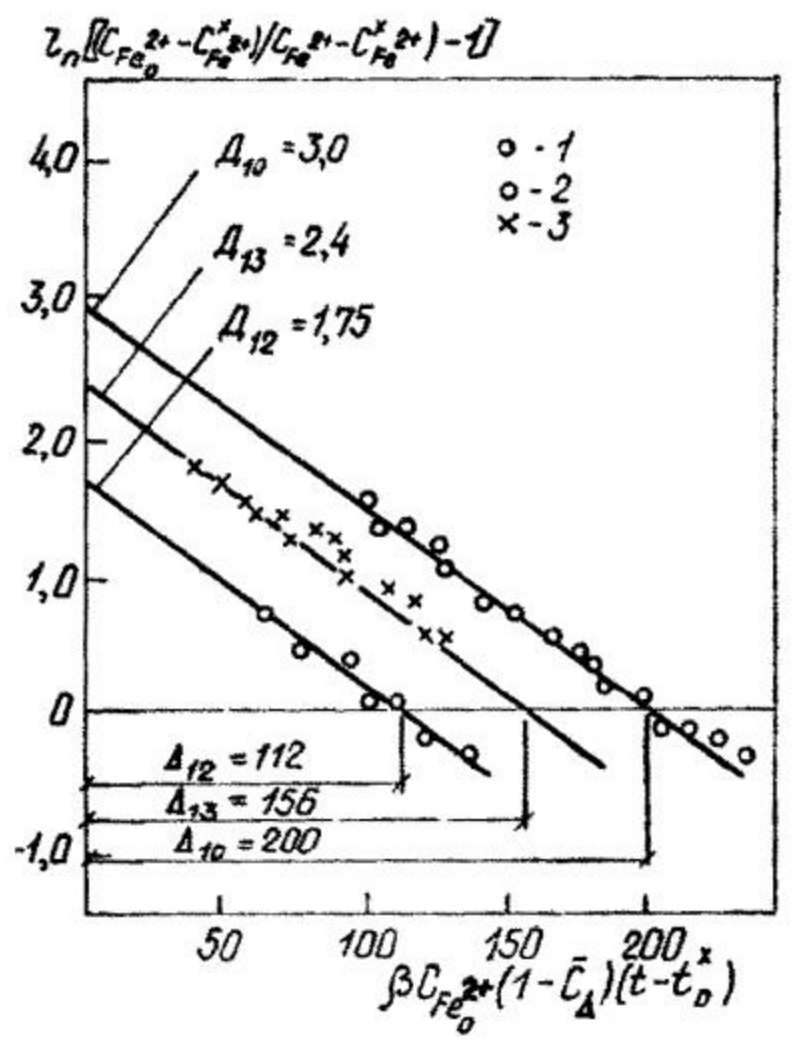


Рис. 21.17. Вспомогательные графики для расчета параметров процесса
1 — скважина № 10; *2* — скважина № 12; *3* — скважина № 13

Таблица 21.5. Расчетные значения параметров

Номер скважины	$C^*_{Fe^{2+}}$, мг/л	Д	Δ, мг·ч/л	$\sigma_{Fe^{2+}}$, (мг·ч/л)$^{-1}$	ξ, мг/л	α_{O_2}/n_0, ч$^{-1}$
10	0,1	3	200	0,015	10,2	0,0075
12	0,3	1,75	112	0,015	4,3	0,0060
13	0,3	2,4	156	0,015	1,4	0,0030

из которых подается непосредственно в водопроводную сеть. Глубина скважин 160 м, производительность от 30 до 60 м³/ч.

Исследования проводились на скважине № 2, каптирующей подземную воду с концентрацией железа $C_{Fe^{2+}}$ =1,5 мг/л. Выполнено три опытных цикла. На всех циклах закачка аэрированной воды в пласт (при $C_{O_{20}}$ =9—11 мг/л) проводилась с расходом Q_3=10 м³/ч и продолжалась в течение t_3=240 ч; отбиралась вода из скважины с расходом Q_0=40 м³/ч.

Первый опытный цикл проводился по традиционной схеме «закачка — откачка». Выходные кривые $C_{O_2}(t)$ и $C_{Fe^{2+}}(t)$ приведены на рис. 21.18. При обработке их получены следующие значения параметров: $\sigma_{Fe^{2+}}$ =0,03 (мг·ч/л)$^{-1}$ и α_{O_2}/n_0=0,003 ч$^{-1}$; значение α_{O_2}/n_0, найденное по выходной кривой $C_{O_2}(t)$, составило 0,05 ч$^{-1}$.

С целью отработки технологии обезжелезивания, предотвращающей поступление (в начальный период откачки) кислородсодержащих вод в систему водоснабжения, последующие два опытных цикла проводились по схеме «закачка — создание оторочки — откачка».

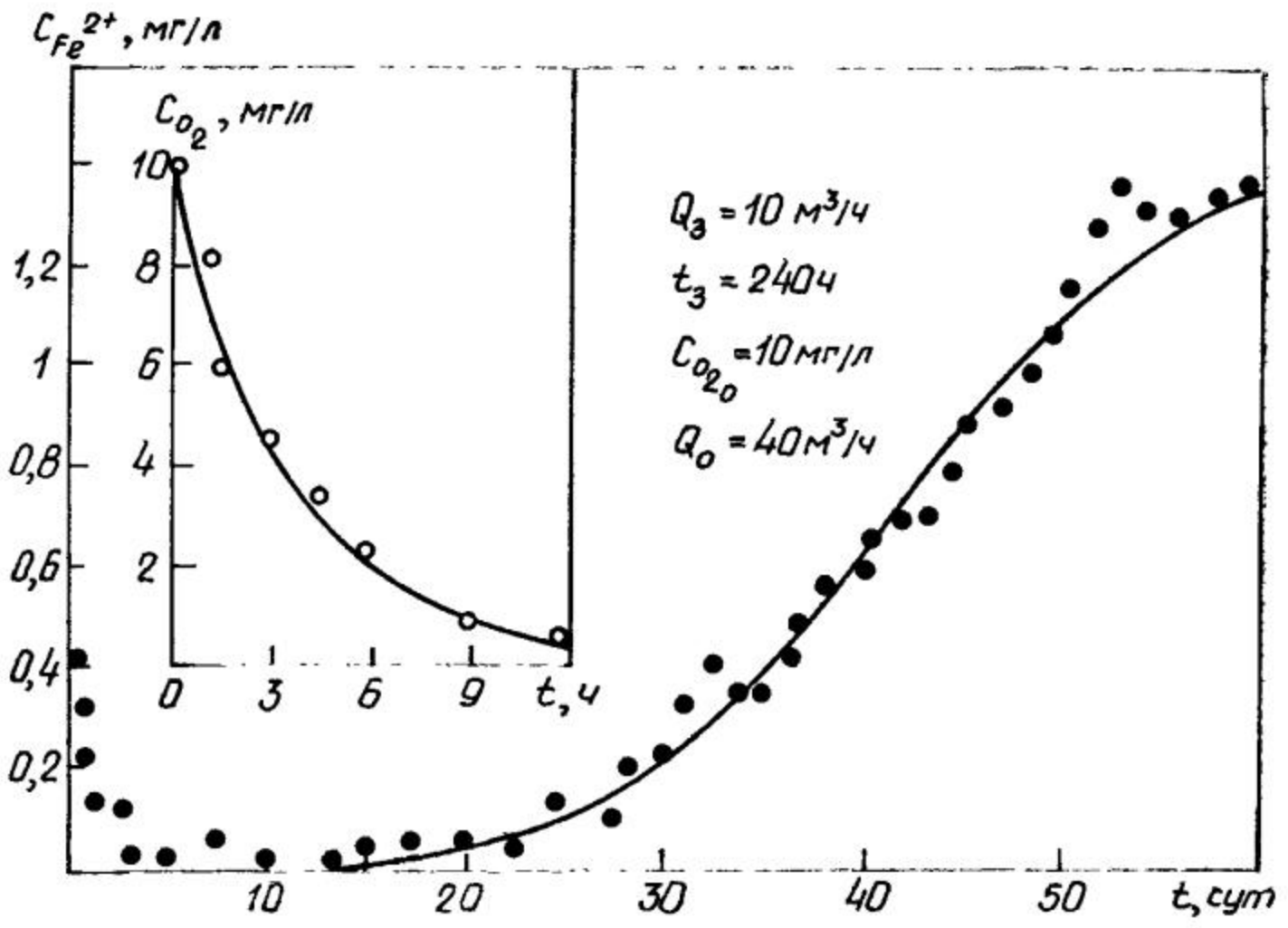


Рис. 21.18. Выходные кривые $C_{O_2}(t)$ и $C_{Fe^{2+}}(t)$

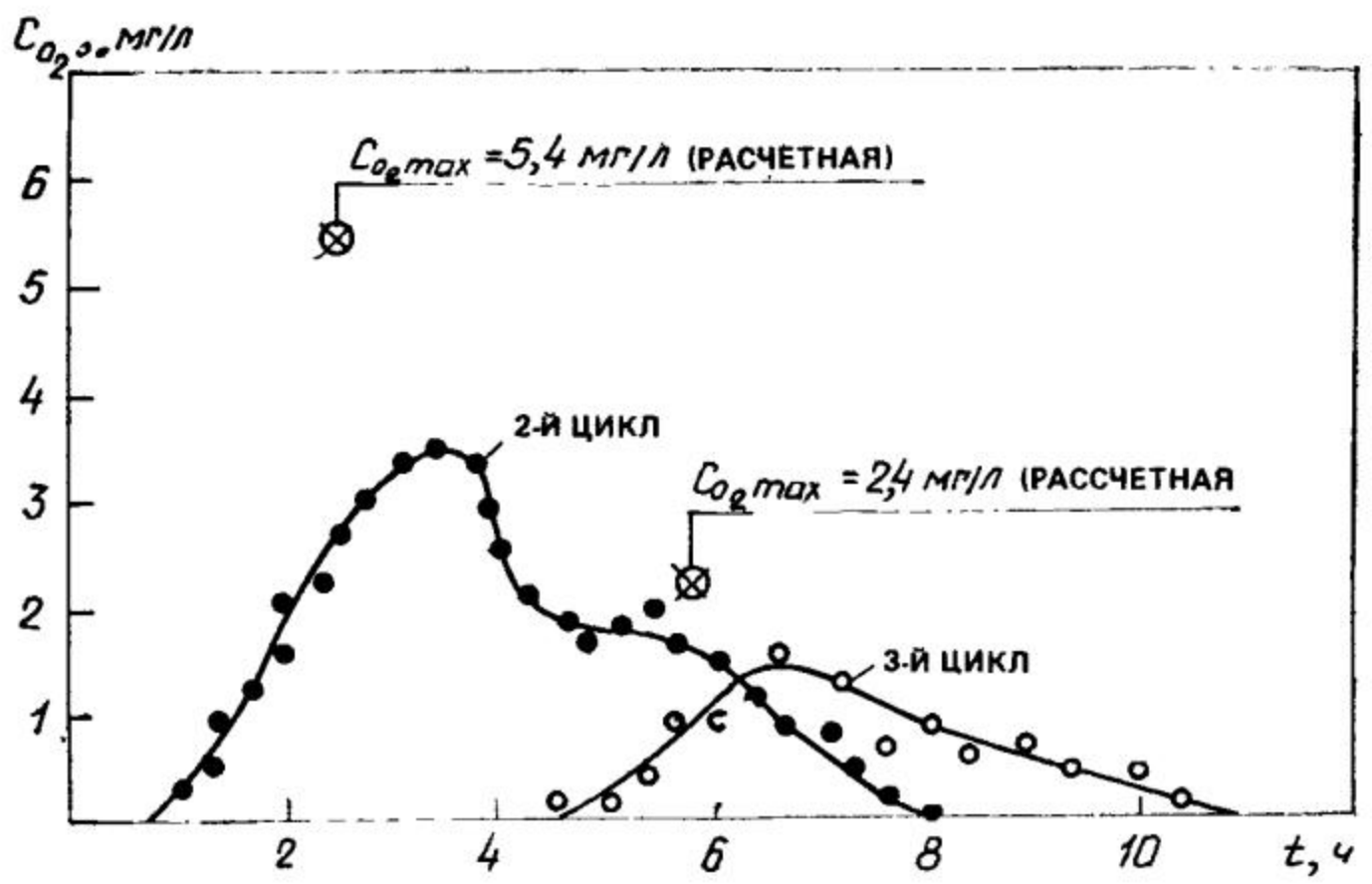


Рис. 21.19. Выходные кривые $C_{O_2}(t)$

Снижение концентрации кислорода в аэрированной воде при контакте ее с породами пласта описывается уравнением

$$C_{O_2}(t) = C_{O_{2_0}} \exp\left(-\frac{\alpha_{O_2} t}{n_0}\right). \qquad (21.47)$$

Если $t_з^*$ — время создания оторочки, то время, за которое при откачке ее задний фронт подойдет к скважине, равно: $t^* = t_з^* Q_з / Q_0$; при этом полное время контакта заднего фронта оторочки с породами пласта составит $t_п = t_з^* + t^* = t_з^*(1 - Q_з/Q_0)$. Принимая в (21.47) $t = t_п$, можно рассчитать максимальную концентрацию O_2, которая будет наблюдаться в период откачки.

Второй опытный цикл проводился при $t_з^* = 10$ ч в расчете на получение $C_{O_2\,max} \approx 5{,}4$ мг/л; на третьем цикле время $t = 23$ ч и при этом ожидалось зафиксировать $C_{O_2\,max} \approx 2{,}4$ мг/л. Выходные кривые $C_{O_2}(t)$, полученные в этой серии опытов, приведены на рис. 21.19.

При создании в пласте оторочки наблюдается достаточно эффективное снижение концентрации кислорода в отбираемой воде и, следовательно, такой технологический прием может быть рекомендован к широкому внедрению. При этом обращает на себя внимание тот факт, что установленные в опытах максимальные концентрации оказываются значительно ниже расчетных $C_{O_2\,max}$. Объяснение этому, по-видимому, следует искать в проявлении эффекта дисперсии; за счет дисперсии происходит дополнительное уменьшение концентрации Fe^{2+} в воде.

21.5. Технологические расчеты систем водоснабжения с установками обезжелезивания циклического типа

Определение продолжительности защитного действия зоны «зарядки» пласта. Из качественного анализа решений следует, что при любом наперед заданном значении $C_д/C_{Fe_0^{2+}} < 1$ (где $C_д$ — некоторая зафиксированная концентрация железа в зоне «зарядки» пласта) существует вполне однозначная зависимость между безразмерными параметрами X и T. Эта зависимость, отражающая закономерность продвижения фронта заданной концентрации к скважине, имеет вид

$$T = \ln\{\exp(X) - 1\} - \ln\left(\frac{C_{Fe_0^{2+}}}{C_д} - 1\right). \qquad (21.48)$$

В дальнейшем нас будет интересовать предельная ситуация, когда фронт с заданной концентрацией $C_д$ подходит к скважине (т. е. достигает сечения $r = r_0$). При этом примем $C_д = 0{,}3$ мг/л, что соответствует требованию ГОСТ 2874—83 «Вода питьевая». Из этого условия найдем t_0 — время защитного действия зоны «зарядки» пласта

$$t_0 = t_0^* + \frac{1}{\beta\sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}}} \ln\{\exp(X_0) - 1\} - B \qquad (21.49)$$

или в автомодельной области (при $X_0 > 3$ с ошибкой, не превышающей 1,5 %) вместо (21.49) можем записать

$$t_0 = At_0^* - B, \qquad (21.50)$$

где

$$A = 1 + \frac{\xi}{\beta C_{Fe_0^{2+}}}; \quad B = \frac{\ln(C_{Fe_0^{2+}}/C_д - 1)}{\beta\sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}}}; \quad t_0^* = \frac{Q_з t_з}{Q_0}. \qquad (21.51)$$

Зависимость (21.50) — аналог хорошо известного уравнения Н. А. Шилова. Из (21.50), (21.51) видно, что время защитного действия зависит от размеров зоны «зарядки» пласта, расхода откачки, а также от параметров, характеризующих процесс адсорбции кислорода и процесс окисления железа. При этом с ростом объема закачки в пласт аэрированной воды и количества адсорбированного кислорода t_0 увеличивается, а с повышением расхода откачки снижается; при прочих равных условиях время защитного действия уменьшается с повышением содержания железа в подземной воде.

Задачей технологических расчетов систем водоснабжения с установками обезжелезивания является нахождение таких величин $Q_з$, $t_з$ и Q_0, t_0 по скважинам, при которых обеспечивается непрерывная подача воды потребителю в заданном Q_s (или требуемом) количестве.

Здесь следует отметить, что диапазон искомых величин является ограниченным. С одной стороны, эти ограничения заложены непосредственно в зависимости (21.50), с другой — они вытекают из требований, которые необходимо учитывать при эксплуатации водозаборных и нагнетательных (поглощающих) скважин. Это в первую очередь выполнение условий

$$Q_0 \leqslant Q_{0\,max}; \quad Q_з \leqslant Q_{з\,max}, \tag{21.52}$$

где $Q_{0\,max}$ и $Q_{з\,max}$ — максимально допустимые расходы воды соответственно при откачке и закачке.

В ряде случаев в зависимости от конкретных условий (в частности, от типа, схемы и режима эксплуатации системы водоснабжения) могут появиться и другие ограничения.

Расчеты одиночных установок. Простейшая схема системы водоснабжения — это одиночная скважина, подсоединенная к сборной емкости (рис. 21.3, *а*). При переоборудовании скважины под установку для обезжелезивания воды в пласте она работает следующим образом. В течение времени t_0 вода отбирается из скважины с расходом Q_0 и подается в сборную емкость; одновременно с этим часть воды в количестве Q_s направляется из емкости потребителю. Затем скважина останавливается и в нее в течение времени $t_з$ из емкости подается вода с расходом $Q_з$. При этом подача воды потребителю не прекращается. Таким образом, сборная емкость предназначена для аккумуляции обезжелезенной воды в объеме, достаточном для компенсации водопотребления и для «зарядки» водоносного пласта. Следовательно,

$$W = t_0 (Q_0 - Q_s), \quad W = t_з (Q_s + Q_з), \tag{21.53}$$

где W — объем воды, накопленный в емкости за время откачки t_0 и сработанный за время $t_з$.

Здесь возможны два случая: а) производительность системы водоснабжения Q_s задана и одновременно с определением $Q_з$, $t_з$ и Q_0, t_0 должен быть установлен рабочий объем W_0 сборной емко-

сти; б) задан объем W_0, требуется найти количество обезжелезенной воды, которое может быть подано потребителю, если установка эксплуатируется при максимально допустимых расходах $Q_{0\,max}$ и $Q_{з\,max}$.

а) Расчеты при заданной производительности установки. Исключая с помощью соотношений (21.53) величины Q_0 и $Q_з$ из (21.50), запишем

$$t_з = \frac{[W(A-1) - BQ_s]t_0 - Q_s t_0^2 - BW}{AQ_s t_0}. \qquad (21.54)$$

Из (21.54) следует, что $t_з > 0$ лишь в том случае, если t_0 находится в диапазоне значений

$$t_1 < t_0 < t_2, \qquad (21.55)$$

где $t_{1,2}$ — корни уравнения $Q_s t_0^2[W(A-1) - BQ_s]t_0 + BW = 0$, равные

$$t_{1,2} = \frac{[W(A-1) - BQ_s] \pm \sqrt{[W(A-1) - BQ_s]^2 - 4BWQ_s}}{2Q_s}, \qquad (21.56)$$

а объем W выбран из условия

$$W > W^*, \; W^* = \frac{BQ_s[(A+1) + 2\sqrt{A}]}{(A-1)^2}. \qquad (21.57)$$

Здесь рекомендуется следующий порядок проведения расчетов. Сначала вычисляют W^* и с учетом соотношения подбирают некоторый объем W. Далее по (21.56) оценивают значения $t_{1,2}$ и согласно (21.55) назначают время t_0. Для принятых W и t_0 рассчитывают $t_з$ и определяют

$$Q_0 = \frac{W}{t_0} + Q_s, \quad Q_s = \frac{W}{t_з} - Q_s.$$

Необходимо при этом рассматривать несколько расчетных вариантов работы установки. Такие варианты образуются за счет принятия различных W и варьирования времени t_0 в диапазоне $t_1 < t_0 < t_2$.

Пример 1. Требуется запроектировать установку обезжелезивания производительностью $Q_s = 50$ м³/ч, если известны: $Q_{0\,max} = 75$ м³/ч, $Q_{з\,max} = 65$ м³/ч, $C_{Fe_0^{2+}} = 1{,}8$ мг/л, $\sigma_{Fe^{2+}} = 0{,}5$ (мг·ч/л)$^{-1}$, $\bar{\xi} = 2{,}87$ мг/л.

Найдем значения параметров A и B

$$A = 1 + \frac{\xi}{\beta C_{Fe_0^{2+}}} = 1 + \frac{2{,}87}{0{,}143 \cdot 1{,}8} = 12{,}15;$$

$$B = \frac{\ln(C_{Fe_0^{2+}}/C_д - 1)}{\beta\sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}}} = \frac{\ln(1{,}8/0{,}3 - 1)}{0{,}143 \cdot 0{,}5 \cdot 1{,}8} = 12{,}5 \text{ ч}.$$

По формуле (21.57) проведем расчет

$$W^* = \frac{12{,}5 \cdot 50[(12{,}15 + 1) + 2\sqrt{12{,}15}]}{(12{,}15 - 1)^2} = 101{,}15 \text{ м}^3.$$

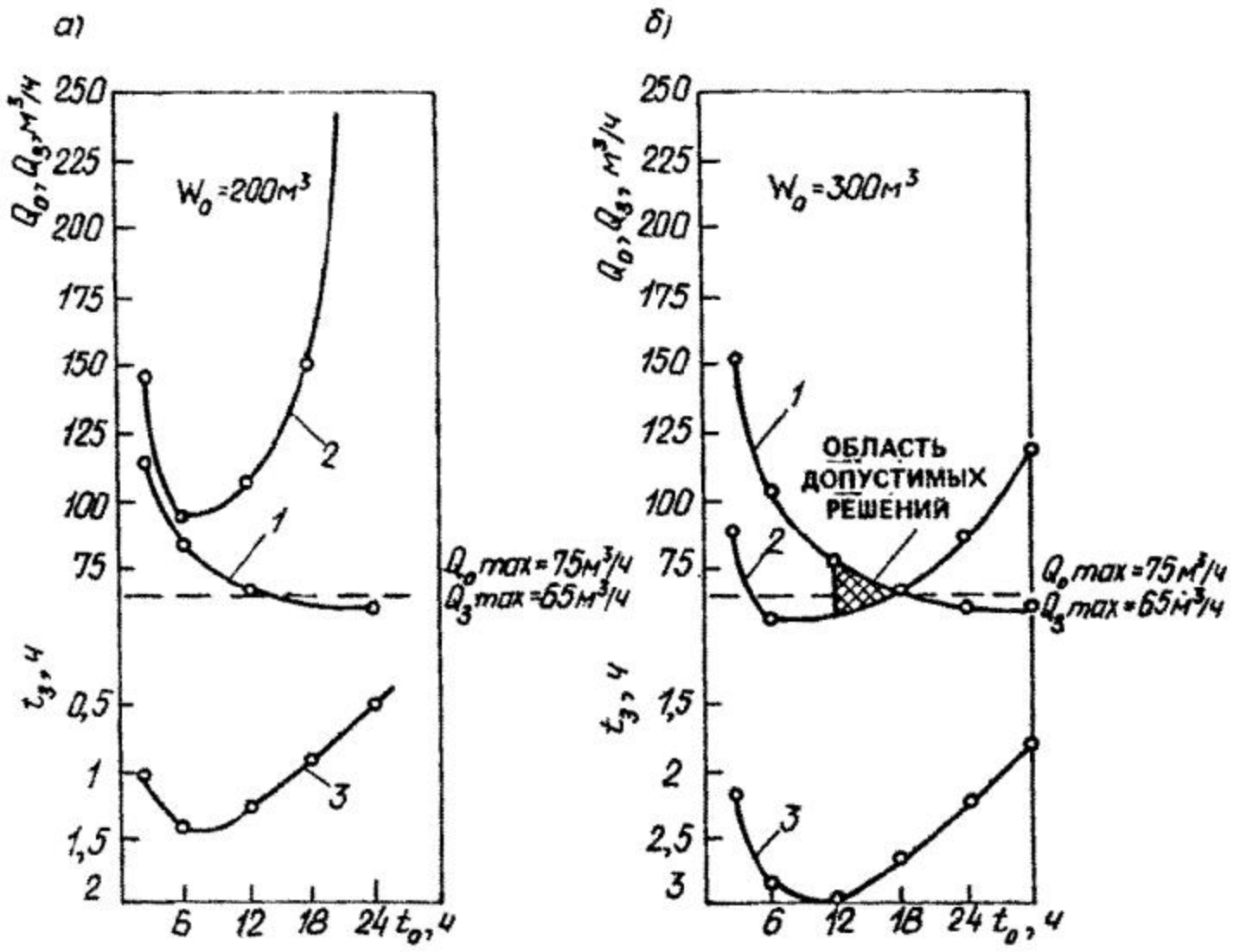


Рис. 21.20. Графоаналитический метод расчета установок на заданную производительность

а — $W_0=200$ м³; *б* — $W_0=300$ м³; *1* — $Q_0=f(t_0)$; *2* — $Q_3=f(t_0)$; *3* — $t_3=t_0$

Согласно (21.57) рабочий объем сборной емкости должен быть больше W^* Примем его равным 200 м³. Тогда

$$t_{1,2}=\frac{[200(12,15-1)-12,5\cdot 50]\pm\sqrt{[200(12,15-1)-12,5\cdot 50]^2-4\cdot 12,5\cdot 200\cdot 50}}{2\cdot 50},$$

что дает $t_1=1,64$ ч и $t_2=30,46$ ч. В области $t_{1,2}$ можно задаваться любым значением t_0. Положим $t_0=3$ ч и проведем дальнейшие вычисления. По формуле (21.54) найдем t_3

$$t_3=\frac{[200(12,5-1)-12,5\cdot 50]3-50\cdot 9-12,5\cdot 200}{12,15\cdot 50\cdot 3}=1,02 \text{ ч}$$

и определим

$Q_0=200/3+50=116,67$ м³/ч;

$Q_3=200/1,02-50=146,08$ м³/ч.

Как видно, при $t_0=3$ ч значения Q_0 и Q_3 превышают свои предельные значения. Снижения расчетных величин Q_0 и Q_3 можно добиться увеличением t_0.

Результаты дальнейших расчетов при $W=200$ м³ представлены в виде графиков на рис. 21.20, *а*. Из этих графиков видно, что с ростом t_0 расход Q_0 непрерывно снижается. Графики $t_3=f(t_0)$ и $Q_3=f(t_0)$ имеют более сложный вид. С увеличением продолжительности откачки время t_3 сначала возрастает, а затем снижается; при этом Q_3, наоборот, сначала снижается, а затем возрастает.

При $W=200$ м³ значение Q_0 оказывается меньше, чем $Q_{0\,max}$, уже при $t_0=8$ ч. В то же время во всем диапазоне изменения t_0 величина Q_3 оказывается больше, чем $Q_{3\,max}$. Поэтому при таких значениях расчетных параметров работа установки обезжелезивания подземных вод невозможна, так как не выполняется одно из поставленных условий ($Q_3\leqslant Q_{3\,max}$).

Расчетные значения параметров Q_0, $t_з$ и $Q_з$ при $W=300$ м³ приведены на рис. 21.20, *б*. Из сопоставления графиков рис. 21.20 видно, что с увеличением емкости башни резервуара возрастает время $t_з$, а расход закачки $Q_з$ снижается. При этом уже при $t_0>2{,}6$ ч величина $Q_з$ оказывается меньше, чем $Q_{з\,max}$. Однако в это время расход Q_0 еще продолжает превышать свое максимально допустимое значение $Q_{0\,max}$. Область допустимых решений ограничивается диапазоном изменения t_0 от 12 до 18 ч (при $t_0<12$ ч, $Q_0>Q_{0\,max}$, а при $t_0>18$ ч, $Q_з>Q_{з\,max}$).

б) Расчеты при заданном объеме W_0 сборной емкости. Исключая с помощью соотношений (21.53) t_0 и $t_з$ из (21.50), запишем

$$\frac{Q_з}{Q_0}=\frac{[W_0+B(Q_0-Q)]\,Q}{(AW_0-BQ_0)(Q_0-Q)-W_0Q_0}. \qquad (21.58)$$

Здесь $Q_з/Q_0>0$, если $Q=Q_з$ задается из условия

$$Q<Q_s^*,\quad Q_s^*=Q_0-\frac{W_0Q_0}{AW_0-BQ_0}. \qquad (21.59)$$

При этом, если $Q_{0\,max}>Q_0^*$ [где $Q_0^*=(A-1)\,W_0/A$], то расход откачки Q_0 задается из условия $Q_0<Q_0^*$; в противном случае $Q_0=Q_{0\,max}$.

Расчеты рекомендуется проводить в следующем порядке. После того как выбрано значение Q_0, по формуле (21.59) вычисляется Q_s^* и назначается некоторое $Q=Q_s$; затем по (21.58) определяют $Q_з/Q_0$ и вычисляют $Q_з$, далее находят $t_з$ и t_0. Если вычисленное значение $Q_з$ превышает $Q_{з\,max}$, то следует принять другое, меньшее значение $Q_з$, и расчеты повторить заново; производительность установки считается обеспеченной при выполнении условия $Q_з\leqslant Q_{з\,max}$.

Пример 2. Требуется определить максимальную производительность установки при следующих исходных данных: $A=12{,}15$; $B=12{,}5$ ч; $Q_{0\,max}=75$ м³/ч; $Q_{з\,max}=65$ м³/ч; $W_0=200$ м³.

Имеем

$$Q_0^*=\frac{200\,(12{,}15-1)}{12{,}5}=178{,}4\ \text{м}^3/\text{ч}.$$

В данном случае $Q_{0\,max}/Q_0^*$ и, следовательно, можно принять $Q_0^*=75$ м³/ч. При этом

$$Q_s^*=75-\frac{200\cdot 75}{12{,}15\cdot 200-12{,}15\cdot 75}=64{,}95\ \text{м}^3/\text{ч}.$$

Положим $Q=60$ м³/ч и по формуле (21.58) вычислим $Q_з/Q_0$. Имеем

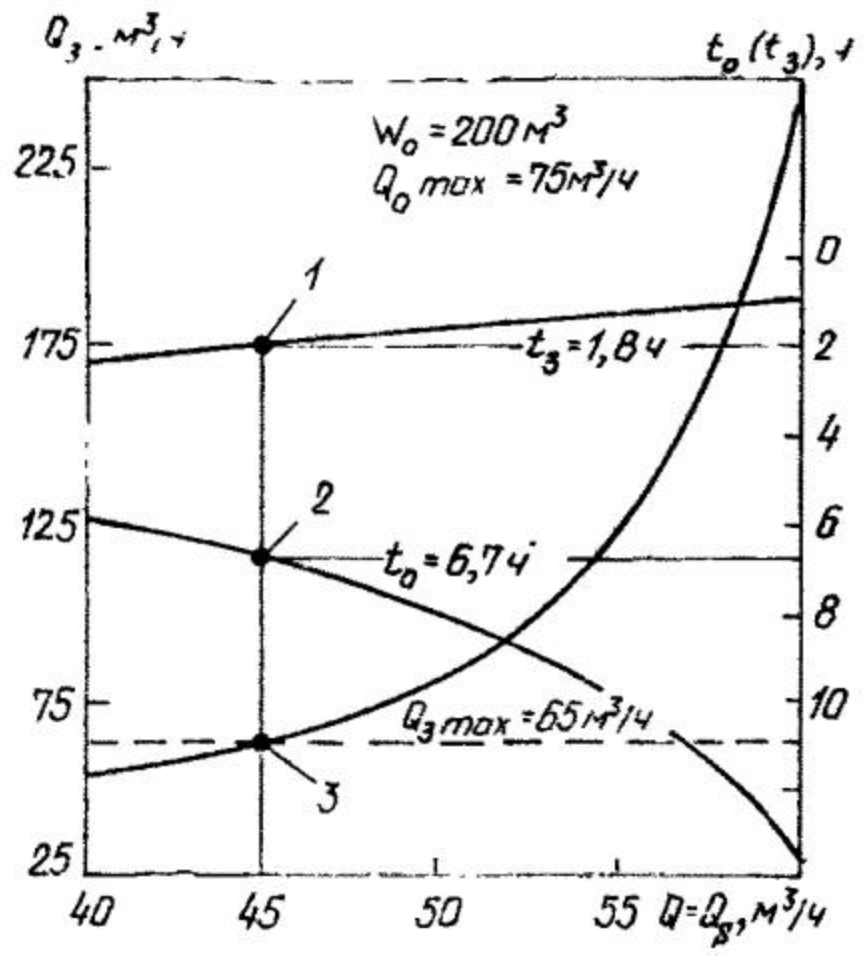
$$\frac{Q_з}{Q_0}=\frac{[200+12{,}5\,(75-60)]\cdot 60}{(12{,}15\cdot 200-12{,}5\cdot 73)(75-60)-200\cdot 75}=3{,}147$$

и $Q_з=3{,}147\cdot 75=236{,}04$ м³/ч (т. е. $Q_з>Q_{з\,max}=65$ м³/ч).

Дальнейшие расчеты по определению $Q=Q_s$, а также продолжительности периодов t_0 и $t_з$ приведены на рис. 21.21. Как видно из графиков, максимальная производительность установки составляет $Q=45$ м³/ч. При этом продолжительность периода отбора обезжелезенной воды равна $t_0=6{,}7$ ч, а продолжительность периода закачки в пласт аэрированной воды должна быть $t_з=1{,}8$ ч.

Рис. 21.21. Графоаналитический метод расчета установки на максимальную прозводительность

1 — кривая $t_з$; *2* — кривая t_0; *3* — кривая $Q_з$



Такой подход является приближенным, так как при выполнении расчетов принимается $\xi = \text{const}$; не учитывается зависимость $\xi = f(Q_з/Q_0,\ t_з)$. Поэтому для эксплуатации необходимо принимать такой режим работы установок, который был бы близок к условиям проведения опытов по пробному обезжелезиванию.

Расчеты многоскважинных систем водоснабжения. Рассмотрим систему водоснабжения (рис. 21.3, *б*), состоящую из N скважин, работающих на один сборный водовод (или подающих воду непосредственно в водопроводную сеть). Будем считать, что производительность водозабора Q_s является заданной и помимо этого известны расходы $Q_{з\max}$ и $Q_{0\max}$, а также исходная концентрация железа $C_{Fe_0^{+2}}$ и осредненные по скважинам параметры $\sigma_{Fe^{2+}}$ и α_{O_2}/n_0.

Примем, что на «зарядку» выводится лишь одна скважина и закачка воды в нее производится с расходом $Q_з$. Тогда из условия обеспечения требуемой нормы водопотребления в количестве Q_s расход откачки по каждой из оставшихся в работе скважин должен быть равен:

$$Q_0 = (Q_s + Q_з)/(N - 1). \qquad (21.60)$$

При этом необходимо выполнение условия

$$t_0 = (N - 1)\, t_з. \qquad (21.61)$$

Последнее означает, что за время t_0, пока из какой-либо одной скважины производится отбор обезжелезенной воды, должна быть завершена «зарядка» остальных скважин.

Подставляя значения Q_0 и t_0 по (21.60), (21.61) в (21.50), получим следующее уравнение:

$$(N - 1)\, t_з \left\{ A \frac{Q_з}{Q_s - Q_з} - 1 \right\} - B = 0. \qquad (21.62)$$

Уравнение имеет отношение относительно $t_з$ лишь в том случае, если выполняется условие

$$Q_з > \frac{Q_s}{(A-1)}. \qquad (21.63)$$

Подставляя выражение для A из (21.51) в (21.63) и учитывая при этом, что $\xi = f(Q_з, Q_0, t_з)$ можем записать

$$\varphi_{O_2}^{-1} = [1 - \exp(-\varphi_{O_2})] > 1 - \frac{\beta C_{Fe_0^{2+}} Q_s}{C_{O_{2_0}} Q_з}, \qquad (21.64)$$

$$\varphi_{O_2} - \frac{\alpha_{O_2}}{n_0} t_з \frac{(Q_s + NQ_з)}{(Q_s + Q_з)}. \qquad (21.65)$$

Таким образом, видно, что установление минимального расхода $Q_з$, при котором выполняется условие (21.64), связано с нахождением времени $t_з = t_{зmin}$. Вместе с тем, если расход закачки задавать согласно условию

$$Q_{з\,max} \geqslant Q_з > Q_з^*, \quad Q_з^* = \frac{\beta C_{Fe_0^{2+}} Q_s}{C_{O_{2_0}}}, \qquad (21.66)$$

то значения $t_з$, найденные из решения уравнения (21.62), оказываются всегда больше $t_{зmin}$.

Следовательно, можно рекомендовать следующий порядок выполнения расчетов. Вычисляя по (21.66) $Q_з^*$ и задаваясь некоторым $Q_з$ на основе уравнения (21.62), определяют время $t_з$. Эта операция фактически сводится к нахождению корней трансцендентного уравнения и поэтому здесь целесообразно применение ЭВМ. Далее, зная $Q_з$ и $t_з$, по формулам (21.60) и (21.61) рассчитывают Q_0 и t_0. Подобные вычисления проводят для ряда значений $Q_з$ и из всех полученных вариантов анализируют лишь те, по которым выполняется условие $Q_0 \leqslant Q_{max}$.

При расчете крупных систем водоснабжения вычисленная по (21.66) величина $Q_з^*$ может оказаться больше $Q_{зmax}$. В таких ситуациях приходится идти по пути увеличения числа скважин (установок обезжелезивания), единовременно выводимых на «зарядку». Это равносильно выделению на водозаборе как бы самостоятельных подсистем. Каждую из таких подсистем рассчитывают по изложенной выше методике. Так, например, если на водозаборе имеется четное число N скважин и требуется вводить на «зарядку» не по одной, а по две скважины, то во всех расчетных зависимостях принимается $N = 0{,}5N$, $Q_s = 0{,}5Q_s$; при этом $Q_з^*$ уменьшается вдвое.

Пример 3. Система водоснабжения из двух скважин (рабочей и резервной) работает с производительностью $Q_з = 1000$ м³/сут. Водоносный горизонт, залегающий на глубине 120 м от поверхности земли, представлен мелкозернистыми глауконитовыми песками. Мощность пласта $M = 6$ м, коэффициент фильтрации

песков $k=10$ м/сут, пористость $n_0=0{,}25$. Подземные воды напорные; отметка статического уровня находится на глубине 70 м.

Скважины являются совершенными по степени вскрытия пласта и располагаются на расстоянии $l_0=35$ м одна от другой. Исходные данные для расчета: $C_{Fe_0^{2+}}=1{,}55$ мг/л, $\sigma_{Fe^{2+}}=0{,}4$ (мг·ч/л)$^{-1}$, $\alpha_{O_2}=0{,}00243$ ч$^{-1}$. При этом $Q_{0\,max}=60$ м^3/ч, $Q_{з\,max}=20$ м^3/ч и $C_{O_{2_0}}=12$ мг/л.

В данном примере (при $N=2$) система должна работать следующим образом: когда из одной скважины производится откачка, часть отбираемой воды в количестве Q_s направляется потребителю, а часть в количестве $Q_з$ подается в остановленную скважину. В таком режиме первая скважина работает в течение времени t_0, пока концентрация железа в отбираемой воде меньше $C_д$; затем процесс в скважинах меняется, т. е. начинается откачка воды из второй скважины, а первая становится на «зарядку».

Рассмотрим несколько подробнее методику проведения технологических расчетов. Прежде всего найдем $Q_з{}^*$ и B

$$Q_з{}^* = \frac{\beta C_{Fe_0^{2+}} Q_s}{C_{O_{2_0}}} = \frac{0{,}143 \cdot 1{,}55 \cdot 45}{12} = 0{,}83 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$B = \frac{\ln(1{,}55/0{,}3 - 1)}{0{,}143 \cdot 0{,}4 \cdot 1{,}55} = 16{,}09 \text{ ч}.$$

Таким образом, решение уравнения (21.62) можно искать в области $Q_з{}^* > 0{,}83$ м^3/ч.

В качестве примера рассмотрим графоаналитический метод расчета для точки $Q_з=3$ м^3/ч. Здесь имеем $N=2$ и, следовательно, уравнение (21.62) записывается в виде

$$\left(A\frac{3}{45+3} - 1\right)t_з = 16{,}09; \quad t_з = t_0;$$

где $A = 1 + 54{,}14\{1 - \varphi_{O_2}^{-1}[1 - \exp(-\varphi_{O_2})]\}$, $\varphi_{O_2} = 0{,}0103 t_з$.

Обозначим левую часть последнего уравнения через $f(t_з)$ и проведем расчет $f(t_з)$ для различных $t_з$. Результаты приведены в табл. 21.6, а графическое решение уравнения представлено на рис. 21.22. При $Q_з=3$ м^3/ч имеем $t_з=t_0=86$ ч. Дальнейшие расчеты по этому примеру выполнялись на ЭВМ. Результаты их в виде графика $t_з=f(Q_з)$ приведены на рис. 21.22. В данном случае (при $N=2$) расход откачки равен $Q_s+Q_з$.

Таблица 21.6. Значения $f(t_з)$ при $Q_з=3$ м^3/ч

$t_з$, ч	φ_{O_2}	A	$f(t_з)$
70	0,714	16,44	1,943
75	0,765	17,30	6,097
80	0,816	18,13	10,653
85	0,867	18,93	15,589
90	0,918	19,71	20,889

Так как Q_0 не может быть больше $Q_{0\,max}$, то $Q_{з(пред)}=Q_{0\,max}-Q_s=60-45=15$ м^3/ч, и, следовательно, максимально допустимый расход закачки должен составлять не 20, а 15 м^3/ч.

Помимо указанных ограничений необходимо также учесть условие, при котором не происходило бы перехвата аэрированной воды, закачиваемой в пласт через одну скважину, другой, работающей в это время в режиме откачки.

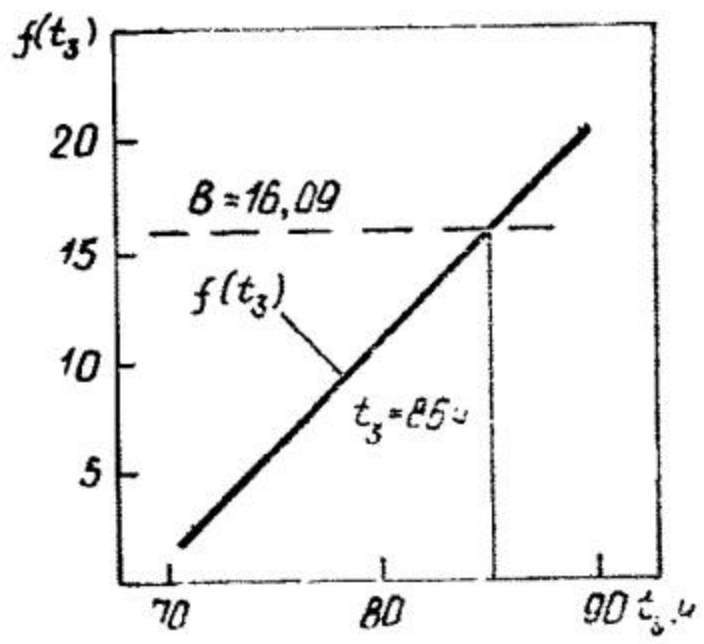


Рис. 21.22. Графическое решение уравнения

Время, за которое частица жидкости успевает пройти расстояние l_0 от поглощающей до водозаборной скважины, определяется выражением

$$t = \frac{2\pi M n_0 l_0^2}{Q_0} F(\beta_0), \qquad (21.67)$$

где

$$F(\beta_0) = \frac{1}{(1-\beta_0)^3}[0,5(1-\beta_0^2) - \beta_0 \ln \beta_0] \quad \beta_0 = \frac{Q_з}{Q_0}. \qquad (21.68)$$

График этой функции при $Q_0 = Q_s + Q_з$ представлен на рис. 21.23. Из него видно, что область допустимых решений находится в диапазоне времени $t_з = t_0$ от 25 до 38 ч и соответственно расходов $Q_з$ от 6,4 до 11,2 м³/ч.

Пример 4. Рассмотрим результаты расчетов, выполненных для водозабора «Гауя-Э» г. Риги. Здесь (см. пример 1) задействовано 14 скважин расчетной производительностью $Q_s = 630$ м³/ч. Исходные данные: $C_{Fe_0^{2+}} = 2$ мг/л, $\sigma_{Fe^{2+}} = 0,33$ (мг·ч/л)$^{-1}$, $Q_{0\,max} = 0,012$ ч$^{-1}$. Максимально допустимый расход откачки $Q_{0\,max} = 60$ м³/ч. При свободном наливе в скважины аэрированной воды (т. е. при обустройстве установок по схеме рис. 22, *а*) $Q_{з\,max} = 20$ м³/ч (при больших расходах происходит затопление павильонов); в случае принудительной закачки (по схеме рис. 21.2, *г*) $Q_{з\,max} = 40$ м³/ч. Концентрация кислорода в аэрированной воде составляет $C_{O_{2_0}} \approx 8$—12 мг/л.

При условии, что на «зарядку» выводят по одной скважине, имеем

$$Q_з^* = \frac{0,143 \cdot 2 \cdot 630}{8} = 22,5 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Следовательно, если идти по пути обустройства установок по схеме рис. 21.2, *а*, то на «зарядку» придется выводить не по одной, а по две скважины; при этом $Q_з^*$ составит 11,3 м³/ч. При напорной же схеме закачки решение существует и при выводе на «зарядку» по одной скважине.

Расчеты по этим двум вариантам представлены на рис. 21.24.

На водозаборе «Гауя-Э» к эксплуатации был принят вариант с принудительной закачкой в пласт аэрированной воды и рекомендован следующий регламент: $Q_з \approx 32$ м³/ч, $t_з = 168$ ч (7 сут), $Q_0 \approx (630+32)/13 = 51$ м³/ч. При этом размеры зоны «зарядки» пласта в окрестности каждой скважины составляют

$$r_f^* = \sqrt{\frac{Q_з t_з}{\pi M n_0}} = \sqrt{\frac{32 \cdot 168}{3,14 \cdot 18 \cdot 0,25}},$$

а время ее защитного действия равно: $t_0 = 7 \cdot 13 = 91$ сут.

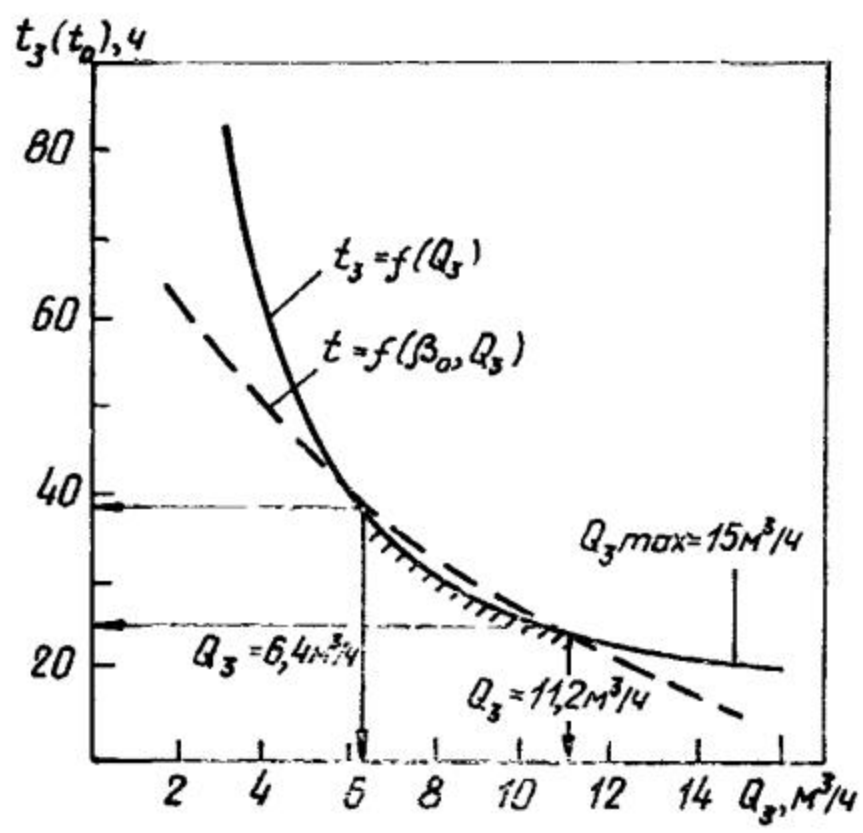


Рис. 21.23. Зависимости $t_з = f(Q_з)$ и $t = f(\beta_0, Q_з)$

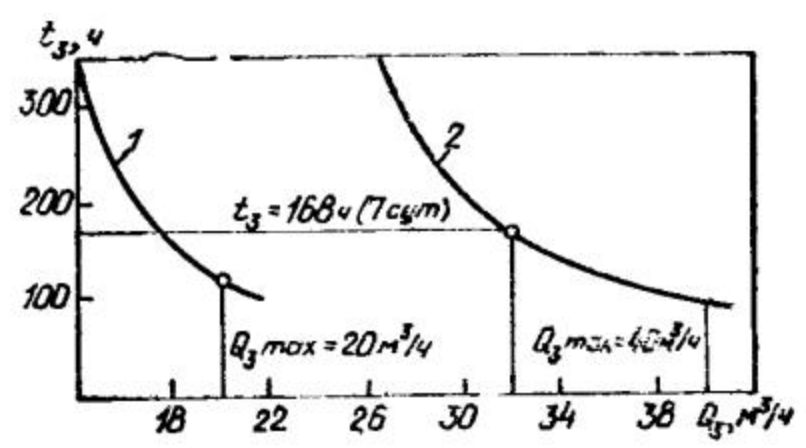


Рис. 21.24. Зависимости $t_з = f(Q_з)$

1 — схема со свободным наливом: $N = 7$, $Q_з = 315$ м³/ч; *2* — схема с принудительной закачкой: $N = 14$, $Q_з = 630$ м³/ч

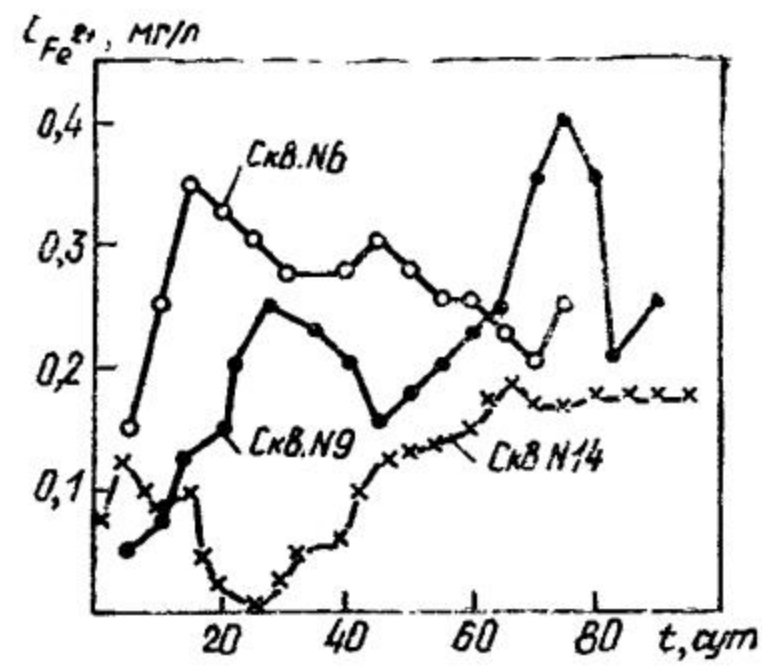


Рис. 21.25. Графики изменения содержания железа в отбираемой воде в процессе эксплуатации установок

Ввод водозабора в действие с установками обезжелезивания (обустроенными по схеме рис. 21.2, *г*) произведен в 1984 г. Пусковой период продолжался в течение четырех месяцев. В 1985 г. технология обезжелезивания подземных вод в пласте на водозаборе «Гауя-Э» принята межведомственной экспертной комиссией.

С момента ввода в эксплуатацию и по настоящее время на водозаборе «Гауя-Э» проводится систематический контроль за работой установок обезжелезивания. Полученные при этом данные (рис. 21.25) свидетельствуют о том, что фактическое время t_0 удовлетворительно согласуется с расчетным. Вода подается в город с концентрацией железа, не превышающей 0,2—0,3 мг/л.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов С. К., Алексеев В. С.** Забор воды из подземного источника. — М.: Колос, 1980. — 239 с.

2. **Алексеев В. С., Гребенников В. Т.** Восстановление дебита водозаборных скважин. — М.: Агропромиздат, 1987. — 239 с.

3. **Богомолов Г. В., Станкевич Р. А.** Бесфильтровые водозаборные скважины в рыхлых породах (теория и практика устройства)//Наука и техника. — 1975. — 152 с.

4. **Гаврилко В. М., Алексеев В. С.** Фильтры буровых скважин. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1985. — 334 с.

5. **Гольдберг В. М., Газда С.** Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. — М.: Недра, 1984. — С. 262.

6. **Зекцер И. С., Плотников Н. И., Язвин Л. С.** Об использовании пресных вод в отдаленной перспективе//Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов. I Всесоюзн. науч. конф. Том 2. — М.: Наука, 1982. — С. 3—7.

7. **Инструкция** по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям питьевых и технических вод/Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых при Совете Министров СССР. — М., 1985. — 29 с.

8. **Классификация** эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод. ГКЗ при СМ СССР. — М., 1983. — 10 с.

9. **Методическое** руководство по разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. — М.: ВСЕГИНГЕО, 1979. — 132 с.

10. **Основы** водного законодательства Союза ССР. — М.: Изд-во Известий Советов депутатов трудящихся СССР, 1971. — 30 с.

11. **Плотников Н. А.** О формировании эксплуатационных запасов пресных подземных вод//Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отд. геологии. — 1982. — Т. 57. — Вып. 2. — С. 118—124.

12. **Плотников Н. А.** Проектирование систем искусственного восполнения подземных вод для водохранилища. — М.: Стройиздат, 1983. — 230 с.

13. **Положение** о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения. № 2640—82, утв. 18 декабря 1982 г. Главным государственным санитарным врачом Союза ССР. — М.: Минздрав СССР, 1983. — 19 с.

14. **Правила** технической эксплуатации систем водоснабжения населенных мест. — М.: Стройиздат, 1979. — 190 с.

15. **Рекомендации** по гидрогеологическим расчетам для определения границ 2-го и 3-го поясов санитарной охраны источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. — М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1983. — 102 с.

16. **Рекомендации** по применению ЭВМ для выполнения комплексных расчетов водозаборов подземных вод. — М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1983. — 133 с.

17. **Руководство** по проектированию сооружений для забора подземных вод. — М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1979. — 106 с.

18. **Санитарные** правила по устройству и эксплуатации водозаборов с системой искусственного пополнения подземных вод хозяйственно-питьевого водоснабжения. — М.: Минздрав СССР, 1979. — 15 с.

19. **СНиП 2.04.02—84.** Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. — М.: Госстрой СССР, 1983. — 132 с.

20. **Соколов А. А., Шикломанов И. А.** Современное состояние и будущее водных ресурсов мира//Водные ресурсы и окружающая среда. — М.: Изд-во МГУ, 1982. — С. 71—97.

21. **Типовая** методика определения экономической эффективности капиталовложений. Утв. Госпланом СССР 12 июля 1979 г., № 693.

22. **Справочник** по бурению скважин/Д. И. Башкатов, С. С. Сулакшин, С. Л. Драхлис, Г. П. Квашнин//Под ред. проф. Д. Н. Башкатова. — М.: Недра, 1979. — 560 с.

23. **Справочник** проектировщика. Водоснабжение населенных мест и промышленных предприятий//Под ред. И. А. Назарова. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1977. — 288 с.

24. **Цейтлин М. Г., Веретов В. В., Азбель Г. Г.** Вибрационная техника и технология в свайных и буровых работах. — М.; Л.: Стройиздат, 1987. — 262 с.

25. **Шевелева Г.** Два взгляда на один съезд//Знание — сила. — 1987. — № 6. — С. 23—31.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава 1. Подземные воды, их использование	4
1.1. Условия залегания подземных вод	4
1.2. Использование подземных вод	5
1.3. Законодательство по подземным водам и технические нормативы	6
1.4. Типы водозаборов подземных вод	7
Глава 2. Эксплуатационные запасы подземных вод	9
2.1. Понятие об эксплуатационных запасах подземных вод и методы их оценки	9
2.2. Гидрогеологические исследования	13
2.3. Основы расчетов эксплуатационных запасов подземных вод	15
Глава 3. Проектирование водозаборов подземных вод	17
3.1. Водозаборы подземных вод и схемы водоснабжения	17
3.2. Надежность систем водозаборов подземных вод	18
Глава 4. Эксплуатационные скважины на воду	20
4.1. Способы бурения скважин	20
4.2. Типы, конструкции скважин и фильтров скважин	23
4.3. Подбор и расчет фильтров	31
4.4. Подбор фильтрующих обсыпок для водозаборных скважин	36
Глава 5. Насосное оборудование	42
5.1. Насосы и насосные станции для оборудования скважин	42
5.2. Насосы и насосные станции на горизонтальных и лучевых водозаборах и каптажах источников	47
5.3. Оборудование и эксплуатация водозаборных скважин с беструбной установкой погружных электронасосов	48
Глава 6. Водозаборы из скважин	54
6.1. Схемы компоновки водозаборов и подачи воды при использовании подземных источников	54
6.2. Расчет водозаборов из скважин	54
Глава 7. Комплексные гидравлические расчеты водозаборов из скважин	63
7.1. Расчеты режимов работы одиночных скважин	63
7.2. Расчет систем подачи воды от скважин	70
Глава 8. Шахтные колодцы	76
8.1. Способы сооружения шахтных колодцев	76
8.2. Расчет дебита шахтных колодцев	81
Глава 9. Горизонтальные водозаборы	83
9.1. Конструкции горизонтальных водозаборов	83
9.2. Трассирование горизонтальных водозаборов	88
9.3. Определение дебита горизонтальных водозаборов	89
9.4. Подбор фильтрующих обсыпок для горизонтальных водозаборов	91
9.5. Расчет водоприемной поверхности горизонтальных водозаборов трубчатого типа	94
9.6. Расчет водоприемной способности труб в горизонтальных водозаборах	99
Глава 10. Лучевые водозаборы	101
10.1. Типы, конструкции, условия применения	101
10.2. Способы и технические средства производства работ	102
10.3. Расчет дебита лучевых водозаборов	110
Глава 11. Каптаж источников	112
11.1. Гидрогеологические условия выхода источников и оценка их производительности	112
11.2. Характеристика воды источников	125
11.3. Каптаж источников	126
Глава 12. Проектирование водозаборов подземных вод в районах многолетней мерзлоты	127
Глава 13. Искусственное восполнение подземных вод (ИВПВ)	132
13.1. Принципиальные схемы ИВПВ	132

13.2. Открытые инфильтрационные сооружения 135
13.3. Закрытые инфильтрационные сооружения 138
Глава 14. Особенности использования подземных вод для сельскохозяйственного водоснабжения 146
14.1. Бесфильтровые скважины 146
14.2. Водозаборы из скважин с уширенным основанием 152
14.3. Водозаборы из скважин, сооружаемых по способу Беннисона, и при посадке фильтров с конусом 156
14.4. Укрупненные водозаборы из систем совмещенных скважин . . 159
14.5. Двухколонные конструкции скважин 160
Глава 15. Свойства и качество пресных подземных вод 162
15.1. Физические свойства воды 162
15.2. Химический состав подземных вод 163
15.3. Микробиология подземных вод и их качество 164
15.4. Изменение химического состава и качества подземных вод при их эксплуатации 167
Глава 16. Санитарная охрана 170
16.1. Задачи санитарной охраны 170
16.2. Зоны санитарной охраны 170
16.3. Проектирование зон санитарной охраны 173
Глава 17. Изменение производительности водозаборов подземных вод при эксплуатации 174
Глава 18. Ремонт водозаборов подземных вод 184
18.1. Методы восстановления производительности скважин . . . 184
18.2. Методы восстановления производительности лучевых водозаборов 197
18.3. Методы восстановления производительности шахтных колодцев 199
Глава 19. Наблюдения на водозаборах подземных вод при их эксплуатации 201
19.1. Основные задачи и состав наблюдений 201
19.2. Приборы для оснащения наблюдательных скважин 202
19.3. Размещение наблюдательной сети. Сроки наблюдений . . . 203
19.4. Обработка наблюдений за подземными водами и водозаборами при эксплуатации 206
Глава 20. Рационализация в системах водозаборов подземных вод . . 207
20.1. Теоретические и практические основы рационализации систем водозаборов подземных вод 207
20.2. Оценка условий рационализации по типам водозаборов подземных вод 209
20.3. Примеры рационализации водозаборов подземных вод . . . 210
Глава 21. Кондиционирование подземных вод на водозаборных сооружениях 213
21.1. Принципиальные схемы установок обезжелезивания. Системы водоснабжения с установками обезжелезивания подземных вод 213
21.2. Моделирование процессов «зарядки» кислородом водовмещающих пород 217
21.3. Моделирование процесса окисления железа в зоне «зарядки» пласта 223
21.4. Натурные исследования по обезжелезиванию подземных вод в пласте 227
21.5. Технологические расчеты систем водоснабжения с установками обезжелезивания циклического типа 244
Список литературы 254

Цена 1 руб. 10 коп.

ПЛОТНИКОВ НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ — профессор, консультант ВСЕГИНГЕО Мингео СССР, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии СССР, крупный советский гидрогеолог и специалист в области водоснабжения, один из основоположников современных представлений об эксплуатационных запасах подземных вод и автор первой отечественной монографии по методике их оценки. Широко известен трудами по изучению промышленных вод, искусственному пополнению запасов подземных вод и регулированию качества отбираемой воды в этих системах. Участвовал в гидрогеологическом обосновании, проектировании и экспертизе большинства водозаборов нашей страны.

АЛЕКСЕЕВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ — профессор, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. Автор многих нормативных документов, рекомендаций и монографий по проектированию и эксплуатации водозаборов подземных вод. Известен как специалист в области конструирования и расчета фильтров скважин на воду, методов опробования водоносных пластов, освоения и восстановления производительности водозаборных скважин, кондиционирования качества подземных вод на действующих водозаборах. Имеет более 70 авторских свидетельств по технологии и техническим средствам для регенерации скважин в системах водоснабжения. Ведет активную работу в составе научно-технического Совета Госкомприроды РСФСР по защите подземных вод от загрязнения и истощения.