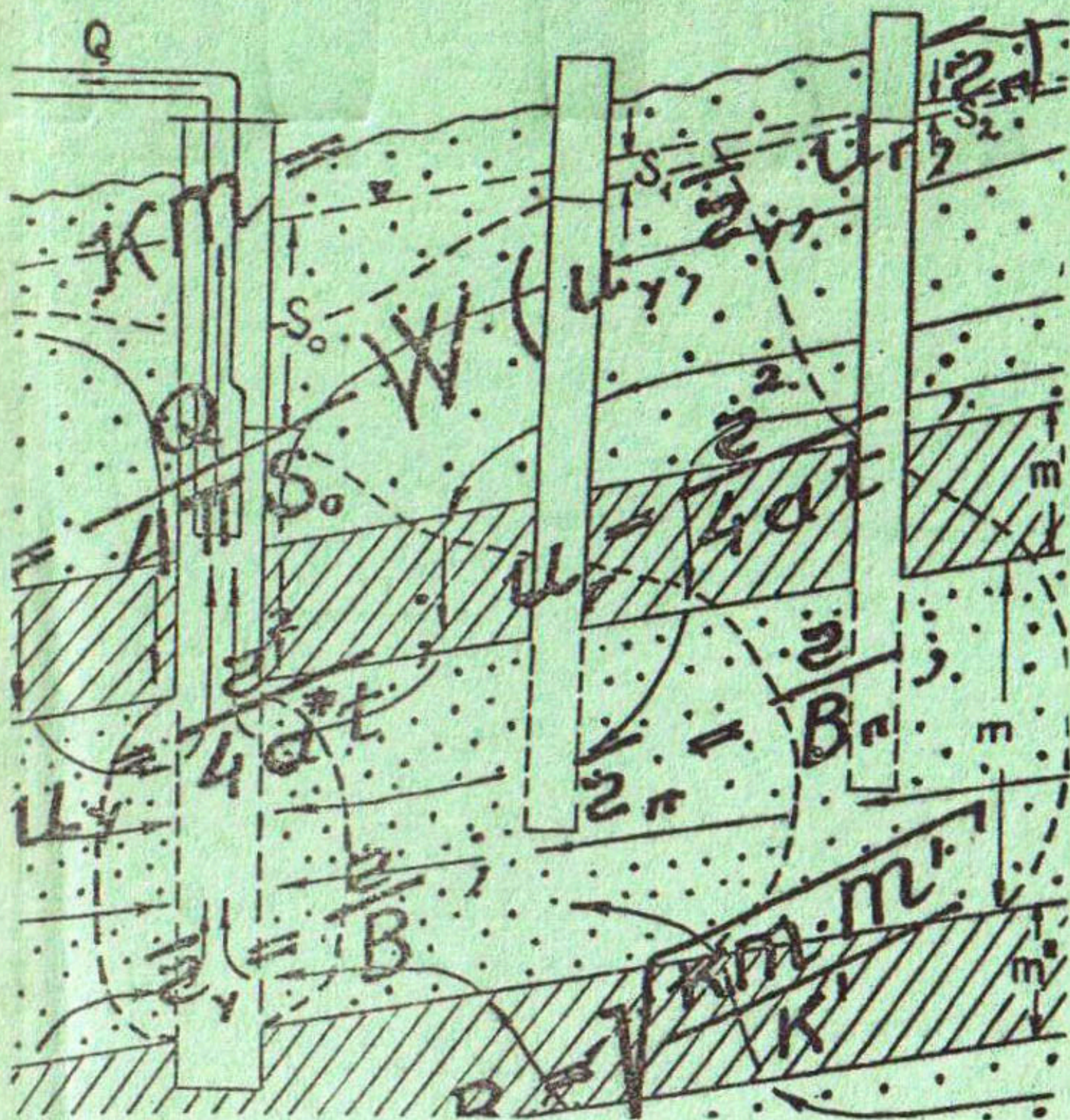


П.П. НАГЕВИЧ

ФОРМИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ВОДОНОСНЫХ ТОЛЩ



Государственный комитет Республики Узбекистан
по геологии и минеральным ресурсам

Государственное гидрогеологическое предприятие
"Узбекгидрогеология"

Институт гидрогеологии и инженерной геологии
им.С.К.Ланге (ГИДРОИНГЕО)

П.П.Нагевич

ФОРМИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ
СВОЙСТВ ВОДОНОСНЫХ ТОЛШ

Ташкент - 1998

УДК 556.36

Нагевич П.П. Формирование и оценка фильтрационных свойств водоносных толщ. Ташкент, 1998 г.

В монографии рассмотрены особенности формирования фильтрационных свойств флювиальных водоносных толщ и оценки их гидрогеологических параметров по данным опытно-фильтрационных работ. Дано объяснение причин отступления фактических понижений уровня при откачках от теоретических решений, получены новые гидродинамические решения, описывающие процессы снижения уровня при опробовании горизонтов различного типа и имеющие универсальный характер. Обоснован алгоритм рационального комплекса методов оценки параметров, приведены примеры расчета.

Для специалистов – гидрогеологов, занимающихся вопросами оценки эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения, и студентов ВУЗов по специальности "Гидрогеология и инженерная геология".

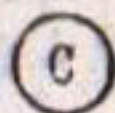
Ил. – 45, табл. – 22, библиогр. – 119 назв.

Ответственный редактор доктор
геолого-минералогических наук

А.С.Хасанов

Рецензенты:
кандидаты геолого-минералогических наук

И.А.Сорокина
В.П.Волков



Институт ГИДРОИНГЕО
Ташкент, 1998 г.

В В В Д Е Н И Е

Проблема рационального использования пресных подземных вод особенно актуальна в условиях острого водного дефицита, характерного как для Республики Узбекистан, так и для Центрально-азиатского региона в целом. Пресные подземные воды, являясь основным источником питьевого водоснабжения населения, практически определяют темпы развития народного хозяйства и социального прогресса республики на ближайшую и далекую перспективу. Эффективность эксплуатации водозаборных сооружений и достоверность прогноза эксплуатационных запасов подземных вод, обоснованных по результатам их разведки, зависят от надежности расчета запасов, геофильтрационных схем и разреза месторождения подземных вод (МПВ). Поэтому достоверность рассчитанных по результатам опытно-фильтрационных работ (ОФР) гидрогеологических параметров пласта, закономерности формирования фильтрационных свойств водонесущих толщ, пространственное распределение параметров в плане и разрезе являются доминирующими и определяющими при оценке гарантированно обеспеченных эксплуатационных запасов подземных вод. Опыт разведки и эксплуатации МПВ показывает, что низкая оправдываемость прогноза связана именно с неучетом этих вопросов, изученность которых в настоящее время недостаточна.

Так, чрезвычайно мало внимания уделяется формированию фильтрационных свойств водоносных толщ, освещение которого ограничено общими соображениями относительно условий образования водосодержащих отложений.

По-прежнему актуальной, несмотря на солидный теоретический базис, созданный трудами Ч.Тейса, Ч.Джейкоба, М.Хантуша, Н.Болтона, Б.В.Боревского, В.А.Мироненко, В.М.Шестакова, Л.С.Язвина и др., остается достоверность оценки геофильтрационных параметров. В последние десятилетия неоправданная самоуверенность гидрогеологов в правильности оценки параметров имеющимися методами расчетов, основанными преимущественно на фундаментальных уравнениях для напорного пласта, и ложная самоуспокоенность в особой точности параметров, полученных с применением ЭВМ, привели к некоторому застою как в области раскрытия гидродинамических процессов притока воды к скважинам в пластах различного

типа, так и углубления теории с учетом особенностей этих процессов.

В результате создавалась тупиковая ситуация, когда многочисленные методики расчета, отражающие конкретные условия питания откачки, не в состоянии отобразить многообразие особенностей формирования притока воды к скважине, обусловленных проявлением влияния различных неучтенных природных факторов, что вызывает отступление процесса снижения уровня при откачках от классических решений "теории скважин" и приводит при интерпретации данных откачек к существенному отличию рассчитанных параметров от реальных.

Таким образом, основной целью монографии явились выявление особенностей формирования фильтрационных свойств флювиальных водоносных толщ и оценка их реальных гидрогеологических параметров как основы эффективного использования месторождений питьевых подземных вод Республики Узбекистан.

Автором исследовались месторождения подземных вод во флювиальных отложениях (речных долин, конусов выноса, межгорных впадин, по С.Ш.Мирзаеву), которые содержат более 90% всех утвержденных эксплуатационных запасов подземных вод, обеспечивающих питьевое водоснабжение республики. Рассматривались следующие основные задачи:

1. Выявление условий формирования фильтрационных свойств водоносных толщ МПВ во флювиальных отложениях.

2. Установление особенностей снижения уровней подземных вод при ОФР и факторов, определяющих отклонение эмпирических опытных данных от имеющих теоретических решений.

3. Обоснование теоретических решений и методических приемов оценки гидрогеологических параметров по данным ОФР с учетом особенностей проявления выявленных факторов.

4. Разработка методики оценки параметров водоносных горизонтов по данным их эксплуатации.

5. Установление пространственных закономерностей распределения гидрогеологических параметров и гидрогеофильтрационной структуры продуктивных водоносных горизонтов МПВ различных типов.

6. Обоснование учета гидрогеофильтрационной структуры про-

дуктивного горизонта (макронеоднородности в разрезе) при оценке эксплуатационных запасов подземных вод.

Методика решения заключалась в анализе большого объема натурных исследований – кустовых опробований водоносных горизонтов МПВ различного типа; имеющихся теоретических основ оценки геофильтрационных параметров; теоретической разработке и тестовой проверке моделированием действия системы "скважина – водоносный горизонт" с учетом факторов, вызывающих отклонения от классических решений; массовой переинтерпретации с новых позиций результатов ОФР из водоносных горизонтов ряда МПВ; анализе пространственного распределения основных геофильтрационных параметров и их представлении в виде специальных карт.

В работе использованы результаты разведки подземных вод для водоснабжения ряда объектов, тематических и научно-исследовательских работ, выполненных автором в период с 1960 по 1996 г. и посвященных, в основном, научно-методическим разработкам особенностей оценки гидрогеологических параметров и эксплуатационных запасов подземных вод Республики Узбекистан.

Монография – результат огромной работы, выполненной за последние 30-40 лет гидрогеологами-разведчиками, обеспечивавшими водоснабжение населения республики качественной питьевой водой. Она отражает и анализирует часть накопленного опыта этого поколения гидрогеологов – его успехи и ошибки, сомнения и убеждения, радость познания и горечь неоправдавшихся надежд.

Автор признателен ведущим ученым Узбекистана и России Б.В.Боревскому, С.Ш.Мирзаеву, В.А.Мироненко, Н.И.Плотникову, В.Г.Самойленко, А.С.Хасанову, В.М.Шестакову, Л.С.Язвину за доброжелательную критику и обсуждение отдельных положений работы на различных этапах исследований, позволивших улучшить ее структуру.

Автор выражает благодарность всем гидрогеологам, общение с которыми в течение длительного периода исследований, споры и обсуждение отдельных вопросов способствовали разработке содержащихся в работе идей и усовершенствованию некоторых практических приемов – А.Г.Амелину, В.П.Волкову, Е.Д.Кафееву, Ю.С.Ковалену, И.А.Сорокиной, Н.Т.Тахирову, Н.Н.Романову, Ю.Д.Черткову и др. Неотценима помощь Е.В.Сергеевой в обработке материалов, подготовке и оформлении.

Работа является данью памяти наставникам автора, стоявшим у истоков решения проблемы, — Р.В.Бородину, М.М.Крылову, П.Н.Ходжибаеву, коллегам-гидрогеологам, принявшим на себя основную тяжесть полевых исследований по разведке запасов подземных вод и творческое осмысление их результатов, — Б.Г.Куприенко, Г.Л.Круковскому, В.Н.Пономареву, И.И.Цхаю, Г.Х.Хашимову.

Автор надеется, что эта, не лишенная недостатков, монография привлечет внимание специалистов-гидрогеологов к поднятым в ней вопросам, а дискуссия по ним будет способствовать дальнейшему развитию теории и практики гидрогеологических расчетов скважин для оценки реальных геофильтрационных характеристик опробуемых водоносных горизонтов. Замечания и предложения по работе будут с благодарностью рассмотрены автором.

ГЛАВА I. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СЮЙСТВ ВОДОНОСНЫХ ТОЛЩ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВО ФЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Рассматриваемый вопрос в советской и зарубежной литературе освещен чрезвычайно слабо и ограничивается, в основном, общими исследованиями условий формирования водосодержащих отложений. Объектом изучения автора являются флювиальные плиоцен-четвертичные образования аллювиального и пролювиального генезиса, к которым приурочены основные месторождения пресных подземных вод (МПВ) Республики Узбекистан, в частности, речных долин, конусов выноса (субаэральные дельты), межгорных и межадырных впадин, пролювиальных шлейфов.

Рассматривая процесс осадконакопления, автор опирается на публикации, посвященные вопросам формирования горного аллювия и пролювия (Н.П.Васильковский, В.И.Елисеев, И.П.Карташов, А.В.Кожевников, Н.П.Костенко, Д.З.Наливкин, В.И.Попов, И.С.Рожков, Ю.А.Скворцов, А.А.Чистяков, Е.В.Шанцер и др.), приняв за основу концепцию Д.В.Ломкина, развитую в дальнейшем И.П.Карташовым (1972), о динамических фазах аллювия, соответствующих различным стадиям развития рек, и проработку А.А.Чистякова (1978) и А.В.Кожевникова (1985), детально рассмотревших аллювиальные и пролювиальные фации и выделивших ряд субфаций.

Процессы литогенеза обусловлены, в первую очередь, глобальной (планетарной) тектоникой, создавшей крупные геотектонические структуры (поднятия горных массивов, впадины), которые регламентируют климатическую дифференциацию регионов, динамику атмосферных потоков и переноса влаги, а также ее распределение на поверхности в виде выпадающих атмосферных осадков, формирующих поверхностный сток, энергия и работа которого определяют литологический состав формируемых отложений (перенос, осаждение твердого стока, переработка осадков).

Существенную роль в процессе литогенеза играет и локальная тектоника, которая определяет блоковое строение отдельных регионов, обусловленное действием пересекающихся тектонических нарушений-разломов субширотного и субмеридионального направления. Активная тектоническая деятельность приводит к неравно-

значной интенсивности подъема или опускания отдельных блоков относительно друг друга. Неотектоническая активность разломов, заложенных в каледонский и герцинский этапы складчатости, проявлялась и в период формирования неоген-четвертичных отложений, определяя поднятую область основного накопления атмосферной влаги в виде твердых осадков в холодные периоды года и опущенную область последующего расходования ее запасов на поверхностный сток в теплые периоды, пути движения которого в пределах этой области были обусловлены высотным положением блоков.

Рассматривая литогенез (Вассоевич, 1963 г.), как последовательную смену стадий гипергенеза, седиментогенеза, диагенеза, катагенеза, метагенеза (прогрессивная направленность литогенеза) до новой стадии гипергенеза (регрессивный литогенез), представляющих собой замкнутый цикл осадкообразования, продолжительность которого исчисляется десятками и сотнями миллионов лет, отметим, что такой процесс, несомненно, имел место в истории развития протерозоя и палеозоя. Однако даже древнейшие осадочные образования мезозоя-кайнозоя находятся в стадии диагенеза или раннего катагенеза-протокатагенеза. Относительно молодых плиоцен-четвертичных отложений можно с полным основанием утверждать, что они не вышли из стадии диагенеза, находясь непосредственно в подстадии анаэробного диагенеза.

Поэтому, затрагивая вопрос формирования отложений продуктивных водоносных горизонтов (ПВГ), как основу, определяющую их фильтрационные характеристики, ограничимся рассмотрением их образования в стадии седиментогенеза и диагенеза.

Процесс формирования фильтрационных свойств плиоцен-четвертичных отложений рассматривается на примере внутригорных (межгорных) впадин и межгорных долин. За основу взята схема стадийного периодического развития осадков, предложенная В.И. Поповым (1963), согласно которой в пределах впадин выделяется два основных фациальных пояса - подгорно-веерный и равнинно-долинный, разбитые на зоны, отражающие деятельность поверхностного потока и состав осадков.

Развитие флювиальных отложений, к которым приурочены про-

дуктивные водоносные горизонты МПВ, можно разделить на три этапа:

I этап – седиментогенез, в течение которого происходят длительная переработка и отложение выносимых водным потоком осадков;

II этап – аэробный диагенез, когда осадки переходят в зону переменного насыщения отложений подземными водами;

III этап – анаэробный диагенез, в процессе которого отложения уже полностью насыщены водой и представляют собой водоносный горизонт.

В пределах III этапа можно условно выделить подзону постаэробного диагенеза, ограниченную глубиной воздействия на водоносный горизонт современного поверхностного стока или глубиной активного водообмена. В последующем анаэробный диагенез происходит в условиях погружения пласта под перекрывающие его отложения и характеризует его жизнедеятельность в напорных условиях без взаимодействия с атмосферой. На стадии седиментогенеза, являющейся главной в процессе формирования фильтрационных свойств отложений, основными определяющими факторами являются следующие (Нагевич, 1995):

первоначальный, исходный состав осадков, приносимых потоком;

продолжительность нахождения этих осадков в зоне активного действия поверхностного стока;

интенсивность и характер воздействия потока на процесс осадкообразования.

Активная тектоническая деятельность в период формирования отложений МПВ приводит к неравномерной интенсивности подъема или опускания блоков относительно друг друга, что на стадии седиментогенеза определяет особенности процесса отложения осадков и их переработки водным потоком. Неотектоника регламентирует динамические фазы развития долины (впадины) в целом или отдельных ее частей. В стадии равновесия в пределах блоков с низкой скоростью опускания преобладает активный седиментогенез, что способствует образованию руслового аллювия перотративного типа вследствие постоянной длительной переработки и дифференциации осадков водным потоком. На стадии аккумуляции, характерной для площади быстроопускающихся блоков, про-

являются процессы пассивного седиментогенеза, когда приносимые осадки не подвергаются переработке водным потоком и являются отложениями констративного типа. Площади этих блоков служат преимущественно местом отложения пойменных осадков, что вследствие наличия в паводковом стоке взвешенных частиц приводит к сохранению в составе заполнителя большого количества глинистого материала, вызывающего относительно слабую проницаемость отложений, условную дифференциацию которых можно произвести по характеру мощности паводковых потоков с выделением зон развития отложений низких, средних и высоких паводков. Однако и здесь могут быть прослежены высокопроницаемые отложения, представляющие собой русловый аллювий констративного типа, достаточно высокие фильтрационные свойства которого обусловлены исходным материалом переработанного на вышележащих участках перстративного аллювия. В значительной мере степень переработки пойменных образований, а, следовательно, и их проницаемость, зависят от ограниченности зоны действия водного потока. В широких долинах (впадинах) возможности миграции потока в пределах ее площади большие и определяются гипсометрией поверхности различных блоков. В узких долинах, где блуждание водотока ограничено шириной, даже пойменные отложения подвергаются интенсивной переработке и переотложению, что определяет их более высокую проницаемость.

При переходе осадков, сформированных на стадии седиментогенеза, в зону аэробного диагенеза (зона периодического насыщения), в которой происходят колебания УПВ от максимально высокого до предельно низкого, глинистые частицы в составе отложений находятся еще в несвязанном состоянии. Это способствует их переходу во взвешенное состояние при подъеме УПВ и последующее перемещение вниз по разрезу и потоку при понижении зеркала. Постоянные сезонные колебания уровня в течение длительного геологического времени способствуют уменьшению глинистой составляющей заполнителя в отложениях и приводят к улучшению фильтрационных свойств пласта.

Наблюдаемый повсеместно в МПВ речных долин верхний высокопроницаемый маломощный (до 5-6 м) слой аллювия (перстративный, по В.И.Пономареву, 1989) отражает постаэробный этап

его развития, не подверженный еще дополнительной геостатической нагрузке. Ограничение распространения перстративного руслового аллювия только верхней зоной представляется не совсем правомерным, так как и нижняя часть разреза водоносного горизонта в определенные периоды геологического развития прошла этот этап, что привело к образованию также высокопроницаемых отложений.

Несколько пониженные по сравнению с верхним слоем фильтрационные свойства этой части разреза обусловлены последующим процессом частичного перемещения глинистых частиц из зоны аэробного диагенеза и уменьшением пористости вследствие уплотнения пород под весом вышележащих пород. Последний играет преобладающую роль на стадии анаэробного диагенеза, когда отложения горизонта перекрываются слабопроницаемыми осадками и погружаются на большие глубины. Последовательность прохождения пластом стадий седиментогенеза, аэробного, постаэробного и анаэробного диагенеза приводит к формированию кусочно-однородных в фильтрационном отношении отложений, площадь развития которых в плане контролируется тектоническими блоками, а в разрезе способствует формированию в пределах пласта аллювия перстративного типа, сравнительно однородного в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Пойменные отложения ассоциируются, как правило, с понятием констративного аллювия, накопление которого осуществляется в интенсивно опускающихся блоках. Однако здесь в связи с большим содержанием в паводковом стоке влекомых и взвешенных наносов, количество которых многократно увеличивается в многоводные годы, и неравномерностью повторения паводков различной мощности, характер проницаемости формируемых отложений значительно зависит от этих факторов. Если приять наследственность наблюдаемой в настоящее время цикличности в распределении поверхностного стока, когда на 12-14-летний цикл падает 3-4 многоводных года, 5-6 средних по водности и 3-4 маловодных, то достаточно обоснованным представляется выделение, как минимум, трех, отличных по проницаемости, зон. Первая, соответствующая площади воздействия умеренно активного седиментогенеза с ежегодной переработкой и переотложением пойменных

осадков, характеризуется наличием в песчаном заполнителе аллювиальных галечников глинистых частиц, существенно уменьшающих проницаемость отложений по сравнению с русловыми. Вторая, отвечающая площади действия относительно пассивного седиментогенеза с периодической переработкой и переотложением пойменных осадков, что приводит к сохранению в составе заполнителя большого количества глинистого материала, характеризуется относительно слабой проницаемостью отложений.

Однако максимальное развитие имеют осадки третьей зоны — пойменные отложения высоких паводков, особенно, катастрофически многоводных лет, периодичность повторяемости которых составляет 24–25 лет при больших заливаемых площадях, мощности потоков и огромном количестве влекомых и взвешенных наносов, общий годовой объем которых, возможно, перекрывает объем привнесенного паводковыми расходами материала за 25-летний период. Мощность сформированного только за один такой год пойменного аллювия может достигать 0,5–1,0 м (наблюдения в долине р. Ахангаран в катастрофически многоводном 1969 г.). Отложения представлены валунно-галечниками на глинистом цементе, что определяет их практическую непроницаемость. Огромная энергия таких паводков способствует первоочередному заполнению осадками участков, приуроченных к блокам погружения, выравниванию рельефа долины и ограничению проникновения потоков в пределы этих участков в менее водные годы. Большого различия в проницаемости пойменных отложений этой зоны в пределах блоков с различной интенсивностью опускания не наблюдается, так как даже в условиях равновесия длительный перерыв между паводками такой интенсивности приводит к укреплению поверхности отложений растительностью, что препятствует их размыву и переотложению, а по составу приближает к пойменным отложениям, формирующимся в фазу аккумуляции на площади быстро опускающихся блоков.

В пределах подгорно-веерного пояса переработка грязелотковых и мелкоземистых осадков, хотя и приводит к определенной дифференциации, но существенно не изменяет глинистый или алевроито-пелитовый состав основной массы осадков, которые

могут включать и определенное количество грубообломочного материала, представляющего собой образования колювия и делювия, выносимые селевыми потоками из горной зоны в предгорья. Проницаемость этих пород, связанных преимущественно с деятельностью мелких саев небольшой водосборной площади (десятки квадратных километров) снежно-дождевого питания, очень низкая. Их переход, а также пойменных отложений этапа пассивного седиментогенеза в зону аэробного диагенеза не приводит к улучшению фильтрационных показателей.

Дальнейшее погружение отложений в стадии диагенеза способствует уплотнению осадков под влиянием геостатической нагрузки, наиболее компактной упаковке зерен породы, уменьшению пористости и, соответственно, ухудшению проницаемости.

Основные этапы формирования фильтрационных свойств флювиальных отложений приводятся в табл. I. Они поясняются изображенными на рис. I условными схемами последовательности формирования аллювиальных водоносных горизонтов, а также формирования перстративного и констративного аллювия в поперечном разрезе речной долины.

На основании анализа изложенного процесса формирования фильтрационных свойств аллювиально-пролювиальных отложений можно сделать следующие выводы:

большая мощность аллювия еще не является признаком наличия высокопроницаемых ППГ;

наиболее проницаемые пласты приурочены, как правило, к блокам, находящимся большую часть геологического времени в условиях равновесия и занимающих среднее гипсометрическое положение относительно максимальных глубин залегания аллювия, представленного одним ритмостратиграфическим комплексом отложений;

гипсометрическое положение приподнятых блоков в замыкающей части структуры, к которой приурочено МПВ, контролирует максимальную возможную глубину развития наиболее проницаемых ППГ;

высокая интенсивность перемещения и вымыва глинистых частиц из перстративных отложений на стадии аэробного диагенеза

Т а б л и ц а I

Схема этапов формирования флювиационных озонов флювиальных отложений

Процессы, показатели, признаки	I. этап - основное формирование				II этап - частич. преобр-я			III этап - оконч. пр.
	седиментогенез				дивагенез			
Активность погреб. стока	активный	умер. - активный	пасс.	пассивный	эрозивный	постэрозивный	анаэрозивный	
Интенсивность переработки отложения	постоянн.	периодич.	эпизодич.	редкий	—	—	—	
Физ. - мех. преобр-е осадков погреб. стоком	постоянн.	периодич.	эпизодич.	не проявл-яется	—	—	—	
То же, поразительными бодами	—	—	—	не происходит	—	—	—	
	высок. дифференц-я осадков, бымыб глин. частиц	удоблетв дифференц-я, частич. бымыб глин. частиц	слабая дифференц-я, неуст. част. бымыб глин. частиц	не происходит	бывш-е глин. ч-ц и их перемещ. вниз по пот. урвню	прим. част. глин. ч-ц из зоны эрозив. дивагенеза	несущест. перемещ. глин. ч-ц потоком п.б.	
Геоморфолог. признаки обезжелезирования	русло пост. водотоков	низкая пойма и русла дог-мех. потоков	средняя пойма	высокая пойма	террасы на площади МПВ	террасы на пл-ду МПВ	террасы на пл-ду МПВ	
Дин. фазы разб. тип аллювия	равнобесия перспертив	преим. разн. преим. перспертив	преим. экз. преим. экз. преим. экз.	аккумулятив	тип аллювия	определяется условиями I этапа	то же	
Фации	русл. бедная	русл. и подм. низких водотоков	поименные средние водотоков	поименные высокие водотоков	то же	то же	то же	
Гидростат. преобр-е	Вымыб легко растворимых солей							бымыб трудн. раствор. солей
Мощность и глубина доз-действия, м	Активный	слож.	русло	зона перем. насыщения	зона насыщения (бодонос. пласт)		зона насыщения (бодонос. пласт)	
					2-50	20-25		
Гидростат. удержание	—	—	—	—	уплотнение порозу с погружением		убел. с глуб. погреб-я	
					несущест.бное	убел. с глуб. погреб-я		
Показатели флювиации, сб-б	высоко - прониц-е	хорошо прониц-е	отн. прониц-е	слабо прониц-е	несущест.б. уменьшение		несущест.б. уменьшение	
					убел.ч-е	уменьшение		
коэф-т флювиации, м/сут.	100 и более	25-50	5-10	1	не подл. оценке (НПО)		не подл. оценке (НПО)	
					НПО	НПО		
Бодонос. бодами	0.1 - 0.2	0.05 - 0.1	0.01 - 0.05	0.01	НПО	НПО	НПО	

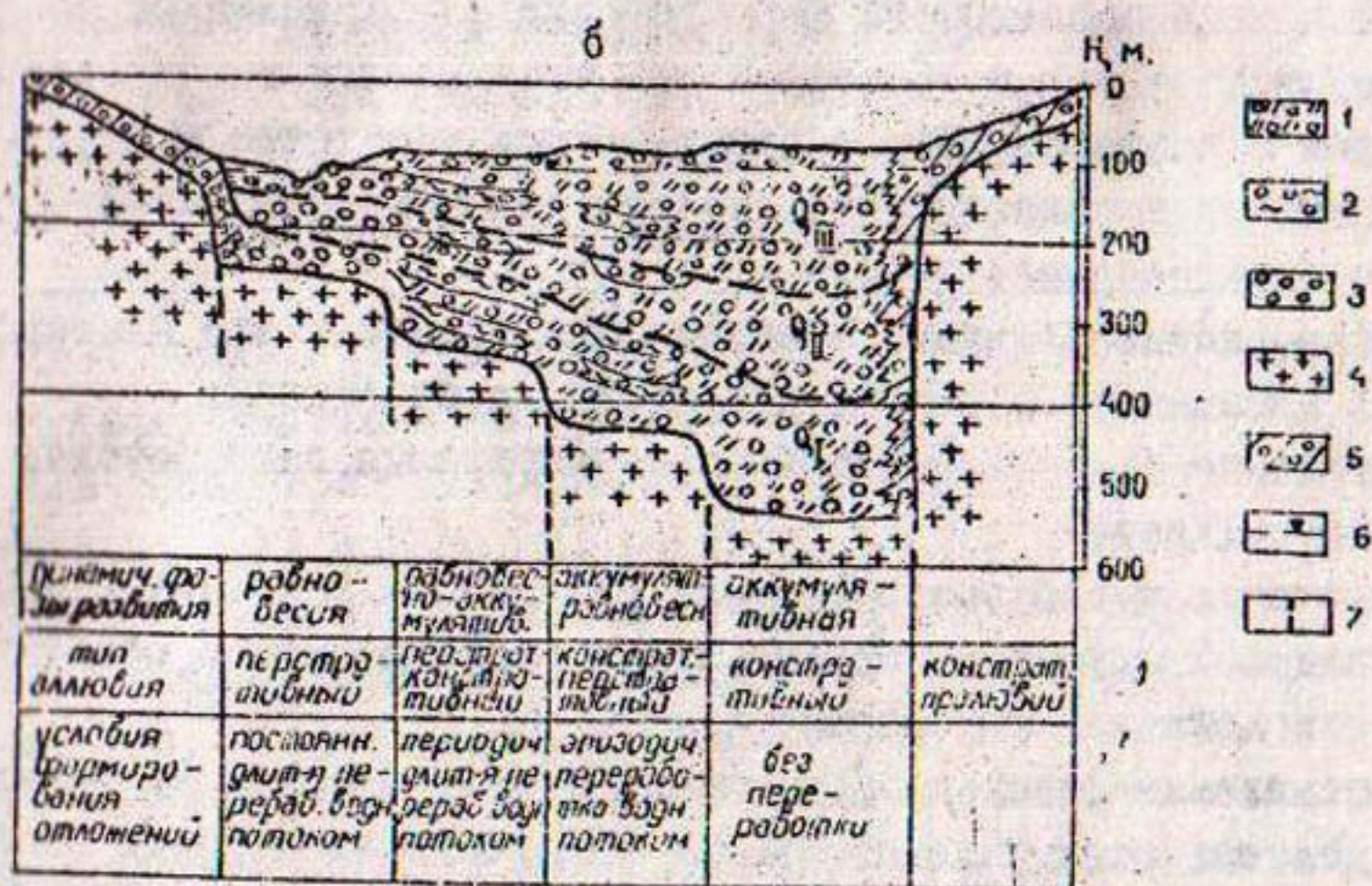
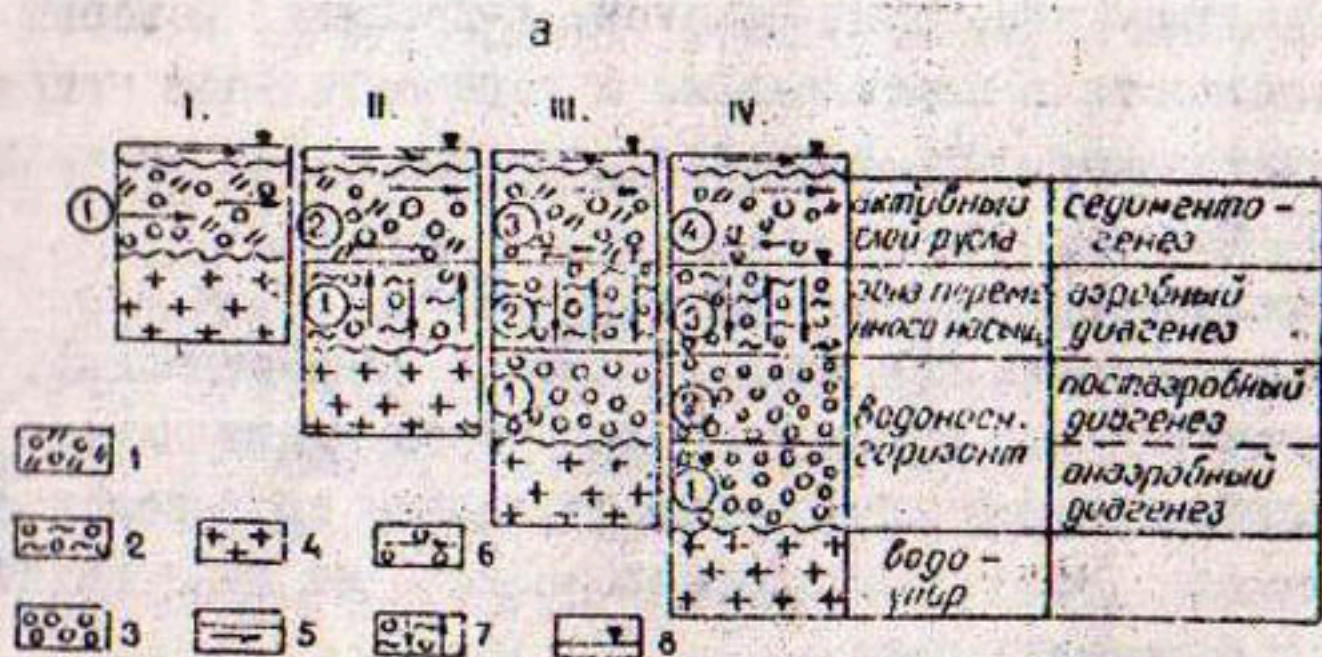


Рис. I. Схемы формирования аллювия долин и впадин. Условная схема последовательности формирования аллювиальных водоносных горизонтов и их фильтрационных свойств (а). Этапы геологического развития и соответствующие им слои аллювия: 1 - исходный материал осадков, приносимых водным потоком; 2 - валуно-галечник с глинистым материалом в заполнителе; 3 - валуно-галечник с песчаным заполнителем; 4 - водоупорное основание; 5 - водный поток; 6 - перемещение осадков в пределах активного слоя русла; 7 - изменение уровня подземных вод и направленности процесса взвешивания глинистых частиц и их перемещения; 8 - положение уровня поверхностных и подземных вод, изменяющееся во времени.

Условная схема формирования перстративного и констративного аллювия в поперечном разрезе речной долины или межгорной впадины (б); аллювий констративного типа: 1 - валуно-галечник на слабом суглинистом цементе; аллювий перстративного типа: 2 - валуно-галечник с глинистым материалом в заполнителе, 3 - валуно-галечник с песчаным заполнителем; 4 - водоупорное основание; 5 - проluvий боковых саев; 6 - уровень подземных вод; 7 - линии тектонических нарушений фундамента.

приводит к образованию относительно однородных (изотропных) в фильтрационном отношении пластов, в пределах которых различие проницаемости в вертикальном и горизонтальном направлениях незначительное, что наиболее характерно для высокопроницаемых ПВГ МВ;

при рассмотрении водоносной толщи МВ в целом можно говорить о ее фильтрационной неоднородности (анизотропии), так как она представляет собой даже при чисто аллювиальном облике отложений переслаивание слоев от слабо- до высокопроницаемых, отражающих условия их формирования — от констративного аллювия до перстративного,

Изложенные особенности формирования фильтрационных свойств отложений необходимо учитывать при составлении геофильтрационных схем и разрезов МВ, обосновывающих положение и развитие продуктивных водоносных горизонтов, для чего исследования должны быть направлены на:

установление блочного строения фундамента и его неотектонической активности в период формирования отложений;

выявление основных бассейнов формирования палеопотоков поверхностных вод;

выявление путей распределения палеостока в пределах долины (впадины) с учетом подвижности и направленности неотектонических движений по блокам;

составление литолого-фациальной схемы, отражающей результаты деятельности палеопотоков в интересующие периоды геологического времени с выделением осадков, отражающих различные этапы их формирования.

При обосновании схемы должны использоваться результаты геофизических исследований (ГИС, ВЭЗ, КВЭЗ) с анализом электрических характеристик отложений (сопротивление, коэффициент анизотропии). Результаты исследований, в частности, показывают, что пойменные отложения высоких паводков отмечаются повышенными сопротивлениями, что вполне увязывается с изложенной структурой формирования осадков, которая также отражается и в распределении минерализации подземных вод.

ГЛАВА 2. СТРУКТУРА ФОРМИРОВАНИЯ РАСХОДОВ ОТКАЧКИ ИЗ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Месторождения подземных вод являются сложными системами, которые характеризуются тесной связью входящих в нее простых систем, подсистем и элементов. МПВ представляют собой ассоциации части таких крупных систем, как литосфера, гидросфера, атмосфера, биосфера, находящихся в определенной причинной структурной связи, но на более низком уровне иерархии. Уровень иерархии при выделении систем обусловлен целью исследований, когда в зависимости от решения задач регионального, локального или частного характера объект рассматривается в виде макро-, мезо- или микросистем. В частности, для структурной организации геологической системы в терригенном разрезе применительно к решению задач нефтепромысловой геологии Л.Ф.Дементьевым (1988 г.) предложено шесть уровней иерархии - от ультрамикроуровня (уровень минерального зерна) до мегауровня (уровень многопластовых месторождений).

При рассмотрении МПВ как системы можно представить ее состоящей из ряда подсистем, которые, в свою очередь, разделяются на ряд элементов. Каждая подсистема характеризует определенные качественные и количественные показатели составляющих ее элементов, создающих образ подсистемы, взаимосвязь которых дает целостное представление о системе. Следует отметить условность выделения отдельных элементов и подсистем МПВ (псевдолитов) на фоне реально существующих (реалитов).

Система месторождения подземных вод в этом случае может быть представлена в виде взаимозависимых подсистем.

1. Литологоструктурная подсистема отражает строение МПВ с выделением таких элементов, как водоносный горизонт, разделяющий слой, водоупор, зона аэрации, в качестве атрибутов которых (основных определяющих) представляются мощность пласта, литологический состав, пористость.

2. Подсистема ресурсов отражает условия питания подземных вод месторождения и предусматривает выделение элементов, характеризующих составляющие ресурсов подземных вод таких,

как метеорологические, гидрологические, ирригационные, поступление которых осуществляется через зону аэрации, в качестве атрибутов которых могут служить мощность зоны аэрации, интенсивность инфильтрации атмосферных осадков, ирригационных вод и др.

3. Подсистема запасов - отражает условия насыщения водой литологических разностей подсистемы и предусматривает выделение таких условных элементов, как емкость водоносного пласта, естественный поток подземных вод, их частичное выклинивание на поверхность земли и дренирование искусственными и естественными водотоками, испарение с поверхности зеркала подземных вод, в качестве атрибутов которых могут служить величина упругой или гравитационной водоотдачи, водопроницаемость, расход естественного потока, объем гравитационных и упругих запасов, расход выклинивания, интенсивность испарения.

Изложенный принцип системности должен быть положен в основу образа МВ как естественной емкости, возможности насыщения которой водой обусловлены питанием (ресурсами) подземных вод, а распределение подземных вод внутри системы отражено в ее запасах.

Для понятия источников формирования расхода откачки необходимо затронуть вопрос количественных категорий подземных вод для того, чтобы, рассматривая составляющие питания откачек в пределах различных месторождений, оперировать определенными терминами.

Не приводя подробного анализа многочисленных классификаций запасов подземных вод, отметим, что принцип, заложенный в определение количественных категорий подземных вод еще в 30-е годы академиком Ф.П.Саваренским, предложившим различать "запасы" подземных вод и их "ресурсы", является стержнем всех последующих классификаций. В понятии Ф.П.Саваренского ресурсы - это "обеспечение в водном балансе района поступления подземных вод, а запасы - количество воды, которое находится в данном бассейне или слое независимо от поступления воды и расхода, а в зависимости от его емкости". Последующие классификации отражали, в основном, объем воды в водоносном

горизонте (запасы) и питание подземных вод (ресурсы), которые, однако, назывались по-разному (пассивные, вековые, статические, геологические, емкостные, естественные — применительно к объему воды в пласте и естественные динамические, динамические естественные ресурсы — применительно к питанию подземных вод или расходу потока). В дальнейшем широкое применение в практике исследований получила классификация Н.Н.Биндемана (1963 г.), в которой выделяются естественные запасы и ресурсы, искусственные запасы и ресурсы, а также привлекаемые ресурсы. Эта классификация, в которой приведено понятие и об эксплуатационных запасах подземных вод, вследствие своей простоты оказалась наиболее жизнеспособной и была положена в основу действующих нормативных и методических документов ГКЗ СССР и Мингео СССР, а впоследствии и ГКЗ РУз.

Последняя классификация, предложенная Б.В.Боревским, Н.И. Дробноходом, Л.С.Язвигим при участии А.Б.Островского (1989), предлагает рассматривать термины "запасы" и "ресурсы" как термины-синонимы свободного пользования, а также вполне справедливо учитывать в структуре запасов (ресурсов) антропогенные факторы их формирования (Шестопалов, 1983 г.). Несмотря на компактность предлагаемой и действующей классификаций и широкое использование последней в практике геологоразведочных работ, применение терминов "запасы" и "ресурсы" как синонимов существенно затрудняет осмысление природной ситуации, приводит к несоответствию между содержанием и образом конкретного термина.

Так, гидрогеолог-разведчик зачастую имеет дело с горизонтами, формирование запасов подземных вод которых за счет ресурсов осуществляется на значительном удалении от участка разведки, т.е. в пределах участка отсутствуют местные ресурсы подземных вод, однако, имеются существенные сложившиеся их запасы как в виде емкостных (упругих, гравитационных), так и в виде естественного потока подземных вод, отражающего динамичность запасов, резко отличающуюся от динамичности ресурсов. Родниковое выклинивание подземных вод или испарение с их поверхности не могут представлять ресурсы подземных вод. Бе-

зусловно, на отдельных участках, где цепочка "ресурсы-сложившиеся запасы-реализация эксплуатационных запасов" ограничена коротким промежутком времени, что характерно особенно для участков искусственного формирования подземных вод в условиях действующей эксплуатации, можно говорить о прямой обеспеченности эксплуатационных запасов за счет ресурсов и правомерности синонимов "ресурсы" и "запасы". Поэтому понятия о ресурсах, как факторах, отражающих питание водоносного горизонта, и о запасах, как характеристиках, отражающих их количественное распределение в водоносных горизонтах, должны быть сохранены. На наш взгляд, целесообразно предложенную классификацию Б.В.Боревского, наиболее полно отражающую современный процесс формирования подземных вод, дополнить фрагментами классификации Р.В.Бородина (1963), отличающейся детальностью и глубиной проработки и рассматривающей "ресурсы" и "запасы" как разные понятийные термины. Удачным представляется и термин Б.А.Листенгартена "сложившиеся запасы", отнесенный к характеристике количества подземных вод, сформированных в условиях действия естественно-антропогенных ресурсов.

Структура классификации количественных категорий подземных вод, отражающая вышеизложенные принципы, приводится на схеме (рис.2). Она характеризует не только структуру взаимодействия ресурсов, сложившихся и эксплуатационных запасов рассматриваемого месторождения (или водоносного горизонта), но и его взаимодействие с прилегающими (смежными) месторождениями, горизонтами или гидрогеологическими (горными) массивами.

Классификация требует некоторых пояснений, особенно, вновь вводимых терминов, которые приводятся ниже.

Естественно-антропогенные ресурсы – величина питания подземных вод конкретного МВ или водоносного горизонта за счет внутренних собственных источников питания в пределах площади развития продуктивного водоносного горизонта. Характеризуются высокой динамичностью в течение года и многолетнем разрезе. Являются приходными статьями баланса подземных вод месторождения, отражающими его современное питание.

В числе главных составляющих можно выделить (по Р.В.Бородину, 1963):

метеорологические (метеогенные, по Ю.С.Ковалеву) ресурсы - инфильтрация атмосферных осадков,

гидрологические ресурсы - фильтрация из реки (потери речного стока),

ирригационные ресурсы - фильтрация из каналов, орошаемых территорий.

В современных условиях лишь метеорологические ресурсы с большой долей условности могут быть отнесены к естественным. Остальные являются или антропогенными или естественно-антропогенными.

Привлеченные запасы подземных вод - как правило, часть сложившихся запасов прилегающих или смежных МПВ (водоносных горизонтов), сформированных за счет их ресурсов, но участвующих в формировании сложившихся запасов рассматриваемого месторождения. Они являются приходной статьей баланса подземных вод. Выделение их из ресурсной части баланса позволяет оценить степень самостоятельности (или суверенности) месторождения и его зависимость от интенсивности использования подземных вод смежного месторождения.

Сложившиеся запасы подземных вод характеризуют количество воды в продуктивном водоносном горизонте месторождения или распределение в водоносном горизонте поступивших в него ресурсов подземных вод и привлеченных запасов. Они отличаются от ресурсов более низкой динамичностью вследствие регулирования емкостью горизонта и отражаются в расходной части баланса подземных вод месторождения. Сложившиеся запасы включают емкостные и динамические (поточные), расходуются на выклинивание в реки, дрена, коллекторы, испарение с уровня грунтовых вод, отток подземным путем за пределы месторождения, перетекание в смежные водоносные горизонты. Принцип разделения ресурсов и запасов должен быть соблюден и относительно так называемых привлекаемых ресурсов.

Термин "привлекаемые ресурсы" должен быть оставлен для характеристики только дополнительного привлечения поверхностных ресурсов в процессе эксплуатации (увеличение притока из реки и других источников питания подземных вод). Параллельно сле-

дует ввести термин "привлекаемые запасы", который характеризует количество подземных вод, привлекаемых при эксплуатации из других водоносных горизонтов и месторождений (перетекание через разделяющие слои) сверх привлеченных в естественных условиях запасов.

Термин "эксплуатационные запасы" в последней редакции В.В.Боревского, полностью отражая современные требования, желательно дополнить характеристикой их связи с ресурсами или запасами. Эксплуатационные запасы - средний за расчетный период расход воды, не превышающий величину сложившихся и привлекаемых запасов и ресурсов, который может быть получен на месторождении (участке) с помощью геолого-экономических обоснованных водозаборных сооружений при заданном режиме, условиях эксплуатации и качестве воды, удовлетворяющих требования целевого использования подземных вод в народном хозяйстве с учетом природоохранных ограничений.

Структура формирования расходов откачек для различных типов МВ и опробуемых водоносных горизонтов (ОВГ) полностью основана на предлагаемой классификации ресурсов и запасов подземных вод (табл. 2). Она предусматривает возможность участия в питании откачки:

сложившихся запасов подземных вод горизонта (МВ), формирующихся за счет региональных ресурсов за пределами области питания откачки и проявляющихся непосредственно на участке опробования в виде насыщенной водой емкости горизонта, естественного потока подземных вод, их частичного выклинивания на поверхность, дренирования естественными и искусственными водотоками, испарения с поверхности зеркала подземных вод, перетекания в смежные пласты;

местных ресурсов подземных вод в пределах области влияния откачки, непосредственно участвующих в питании откачки, в виде инфильтрации атмосферных осадков, потерь ирригационных вод с полей орошения и т.д.;

привлекаемых ресурсов в пределах области влияния откачки за счет увеличения питания из естественных (реки) и искусственных (каналы, дренаж) водотоков;

Т а б л и ц а 2

Структура формирования расходов откачек для различных МПВ и СВГ

Месторождение подземных вод													сметн. вг
определяемые водоносный горизонт													
Месторождение подземных вод	Тип горизонта	ресурсы											
		региональные (форм. за предел. обл. питания)					местные (в пределах обл. питания)						
		сложившиеся запасы											
		динамические (поточные) запасы											
Е.м.с.с. запасы		естест. пополн. подз. вод	быкиин. - разности, дрены, река	испарен. с поверхн. зерк. п.в.	перепе. ханье в смежные пласты	инф.-я под. вод - атм. сс. пр. воды	увел.-е пу. - тания из ск. мест и искусств. водоток	перепе. - канье из смежных пластов	приблизит.				
1. е.р.з.б.м. 2. у.р.р.у.г.													
Речные долины - участки расширения - участки сужения	безнапорн.	⊕ (1)	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	
	То же	⊕ (1)	+	+	+	+	+	+	⊕	+	+	+	
Конусы выноса межгорных впадин: головн. часть периф. зона голов. части	"	⊕ (1)	+	-	-	-	+	+	+	+	+	±	
	"	⊕ (1)	+	+	+	+	+	+	⊕	+	+	±	
периферийн. часть	слоистая вод. толща	⊕ (2)	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	
Артезианс. бассейны	напорный	⊕ (2)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Примечание. Кругом отмечены составляющие запасов и ресурсов, учтенные в современных методиках расчета параметров и положенных в их основу зависимости.

привлекаемых запасов в пределах области влияния откачки за счет протекания сложившихся запасов смежных водоносных горизонтов.

Перечисленные составляющие формирования расхода откачки указывают на сложность процесса, происходящего при опробовании пласта, особенности которого зачастую не учитываются в имеющихся классических решениях теории скважин, но которые оказывают определяющую роль на форму и размеры воронки депрессии, а соответственно, и на результаты определения геофильтрационных параметров по данным опытно-фильтрационных работ.

ГЛАВА 3. ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ, ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ (ОФР)

Состояние изученности вопроса

Теория движения подземных вод к скважине при проведении опытных откачек достаточно детально разработана в 40-90-е годы зарубежными и советскими гидрогеологами. Исследованиями, основанными на аналитических и численных решениях и экспериментальных данных обработки ОФР, сделан существенный шаг в интерпретации результатов опытных откачек от использования теоретических решений для двух типов пластов - напорного и безнапорного - в условиях установившегося движения (зависимости Дюпюи-Тима, Форхгеймера, Маскета, Гиринского, Бабушкина и др.) к применению методов, основанных на решениях задач неуставившегося движения с расширением типов водоносных горизонтов, включая напорные пласты с протеканием через разделяющие слои, двухслойные водоносные пласты (зависимости Ч.Тейса, Джейкоба, М.Хантула, Н.Боултона, В.М.Шестакова, В.А.Мироненко и др.).

Наиболее полный обзор имеющихся на конец 60-х годов методик расчета параметров изложен в работе G.F. Krivetsan и

N.A.Ridder (1970), рассматриваемой автором как руководство по обработке данных опытных откачек для оценки параметров. Здесь приведены основные теоретические зависимости для четырех водоносных горизонтов (напорный, полунанпорный, полубезнапорный, безнапорный), описывающие установившийся и неуставившийся характер процесса снижения УПВ при откачках из совершенных и несовершенных скважин. Методы, основанные на решениях зарубежных исследователей (Дюпи, Тим, Тейс, Джейкоб, Хантуш, Боултон и др.), изложены с приведением примеров расчета параметров в определенной последовательности и с учетом ограничений на их применение. В работе учтена предшествующая ей фундаментальная монография **M.S.Hantush (1964)**, посвященная гидравлике скважин с его решениями для условий перетекания.

Первой отечественной работой такого типа является книга, подготовленная коллективом авторов под редакцией **В.М.Шестакова и Д.И.Башкатова (1974)**, в которой рассмотрены основные расчетные схемы и методики оценки параметров различных типов водоносных горизонтов как зарубежных, так и отечественных авторов. Но в нее не вошли все имеющиеся к тому времени схемы и методики. В монографии **В.А.Мироненко, В.М.Шестакова (1978)** на основе обзора и анализа теоретических положений ОФР, мирового и отечественного опыта детально рассмотрен более широкий ряд расчетных схем и методик обработки откачек как из совершенных, так и несовершенных скважин. Большое внимание уделено вопросам пространственной геофильтрационной изменчивости.

Существенный вклад в практическое внедрение отдельных методик расчета оценки гидрогеологических параметров при интерпретации ОФР внесла работа **Б.В.Боревского, Б.Г.Самсонова, Д.С.Язвина (1973, 1979)**, выдержавшая два издания и ставшая настольной книгой гидрогеологов-производственников. В ней, в основном, рассматриваются возможности наиболее простых, так называемых методов Джейкоба-Тейса, выведенных для условий изолированного напорного пласта, на все типы водоносных горизонтов (напорные с перетеканием, безнапорные и др.). Установлены критерии их применения для водоносных горизонтов, отличных от напорных.

Помимо этих основополагающих работ, частные случаи оценки параметров рассматриваются И.В.Зелениным (1976 г.), П.Н.Костиковичем (1979), А.В.Надарейшвили (1978 г.).

В последнее десятилетие уточнения решений и доработки методик для различных типов пластов имеются в исследованиях К.Р.Раштона и В.К.Чена (1977), С.Эйлига и И.С.Хелепаски (1976), С.М.Кейса и Н.С.Аллиего (1977), Брюса Ханта (1977), Л.Джонсона и У.Б.Братсерта (1979), У.С.Уолтона (1978), Г.И.Нванквара, М.А.Черри и Р.В.Гиллхема (1984), А.И.Эл-Кад и У.Б.Братсерта (1986), З.Сена (1986), В.М.Шестакова (1983), В.М.Шестакова и Т.В.Азаровой (1986), И.К.Невечери (1988), Г.Д.Реткович (1988 г.), Е.А.Ломакина, В.А.Мироненко, В.М.Шестакова (1988 г.) и др.

Вопросы учета инерционности скважин при проведении ОФР рассмотрены Ж.Х.Блеком и К.Л.Киппой (1977 г.), П.Р.Фински (1977 г.), В.М.Шестаковым (1981), И.Мухой и В.Павликовой (1988 г.).

Анализ всех перечисленных работ приводится ниже при рассмотрении различных типов водоносных горизонтов применительно только к поровым коллекторам подземных вод, приуроченных к флювиальным отложениям.

Краткий обзор методик оценки параметров для различных схем и рекомендаций по их использованию

Рассмотрим рекомендуемые методики интерпретации ОФР в рамках основных расчетных схем, изложенных в перечисленных работах.

Для всех схем приняты следующие условия:

скважины совершенные;

расход откачки постоянный;

водоносный горизонт изотропный;

пласт неограниченный по простиранию (за исключением схемы III).

При описании схем придерживаемся типов водоносных горизонтов, выделенных в работе (Kruzevan, Ridder, 1970):

напорный водоносный пласт, изолированный в кровле и подошве непроницаемыми породами ($K_p \approx 0$);

напорный пласт с перетеканием через слабопроницаемые разделяющие слои ($K_p \ll K_{пл}$);

безнапорный пласт.

Схема I - напорный изолированный пласт

Питание откачки осуществляется только за счет упругих запасов опробуемого пласта в условиях бассейна при отсутствии движения подземных вод в виде естественного потока.

Основной зависимостью, описывающей неустановившийся процесс снижения уровня при откачке, является уравнение Тейса:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W(u), \quad (1)$$

где S - понижение уровня, м; Q - расход откачки, $m^3/сут$; km - коэффициент водопроницаемости, $m^2/сут$; $W(u)$ - функция скважин; $u = \frac{r^2}{4at}$ - безразмерный аргумент функции; r - радиус скважины, или расстояние наблюдательной скважины от опытной, м; a - коэффициент пьезопроводности, $m^2/сут$; t - время от начала откачки или восстановления после ее окончания, сут.

При значениях аргумента $u < 0,1$ функция скважины переходит в логарифмическую, и уравнение описывает процесс снижения при квазистационарном режиме:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} B_p \frac{2.25at}{r^2}. \quad (2)$$

На этих зависимостях основаны широко известные методы расчета параметров.

Методы Джейкоба (Боревский, Самсонов, Язвин, 1979).

I.1. - метод временного прослеживания основан на уравнении (2) и предусматривает построение графика прослеживания в координатах $S - \lg t$.

I.2 - метод площадного прослеживания предусматривает построение графиков в координатах $S - \lg r$.

I.3 - метод комбинированного прослеживания основан на анализе графика $S - \lg t/r^2$.

1.4 - метод эталонной кривой Тейса основан на уравнении (1) и заключается в сравнении фактических графиков прослеживания во времени в координатах $P_g S - P_g t$ с графиком эталонных кривых Тейса, построенным в том же масштабе в координатах $P_g W(u) - P_g^4/u$.

1.5. - метод обработки периода восстановления аналогичен методу временного прослеживания, в котором график прослеживания отроится в координатах $S - P_g \frac{t_s}{T+t_s}$, где t_s - время восстановления, T - время продолжительности откачки.

Все методы в зависимости от количества наблюдательных значений рекомендуются для оценки параметров напорных пластов при условии приведения их к одним значениям.

Дополнительные методы, основанные на уравнении Тейса, предусматривают или анализ наклона прямой в любой точке графика в координатах $S-t$ (Димич, 1977), или соответствие наклонов участков эталонных и опытных кривых - метод S_m (Зен, 1968), но, в целом, приводят к тем же результатам.

Схема II - напорный водоносный пласт с перетеканием через разделяющие слои

Перетекание из водоносного пласта с постоянным напором. Питание откачки осуществляется в начальный ее период за счет упругих запасов опробуемого пласта с постепенным увеличением доли питания за счет перетекания через разделяющий слой прилегающих запасов смежного пласта. При их значительном количестве, существенно превышающем отбор, через определенный промежуток времени питание откачки полностью осуществляется за счет сложившихся запасов смежных пластов.

Основной зависимостью, описывающей процесс снижения уровня при откачке в условиях высокой по сравнению с опробуемым пластом проницаемостью подпитывающего пласта и жестком режимом в разделяющем слое, является уравнение Хантуша-Джейкоба (Мироненко, Шестаков, 1978; Hantush, 1964; Kruseman, Ridler, 1970)

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W(u, \tilde{u}),$$

(3)

где $W(u, \bar{z})$ - функция перетекания, табулированная и приведенная в работах /Де Уист, 1969; Kruseman, Ridder, 1970/;

$\bar{z} = \frac{z}{B}$; B - параметр перетекания, м; $B = \sqrt{\frac{km \cdot m'}{K_p}}$ - при одном разделяющем слое; $B = \sqrt{\frac{km \cdot m' \cdot m''}{(m' + m'') \cdot K_p}}$ - при двух разделяющих слоях; m, m', m'' - мощности разделяющих слоев, м; K_p, K'_p, K''_p - коэффициенты фильтрации разделяющих слоев, м/сут.

При большой длительности откачки $t > \frac{5B}{a}$ / наблюдается стабилизация понижений напора в скважинах, которая описывается уравнением:

$$S_m = \frac{Q}{2\pi km} K_0(z/B), \quad /4/$$

где $K_0(z/B)$ - функция Бесселя нулевого порядка второго рода от мнимого аргумента, которая протабулирована и приводится в работах Мироненко и др. /1978/; Шестаков и др. /1971/; Kruseman, Ridder /1970/, т.е. функция $W(u, z/B) \rightarrow 2K_0(z/B)$.

При $z/B < 0,3$ уравнение /4/ принимает вид

$$S_m = \frac{Q}{2\pi km} e^{-\pi} \frac{1.138}{z}. \quad /5/$$

На основе этих зависимостей предложен ряд методик расчета, изложенных в работах Мироненко, Шестакова (1976); Шестакова, Башкатова /1974/, Kruseman, Ridder /1970/, основные из которых приведены ниже.

Метод эталонных кривых Хентуше-Джейкоба /1964/ основан на уравнении 3 и заключается в сравнении фактических графиков прослеживания понижения в наблюдательных скважинах во времени в координатах $\lg S - \lg t$ с одной из эталонных кривых, построенных в том же масштабе в координатах $\lg W(u, \bar{z}) - \lg 1/u$.

Метод Хентуше I /точки перегиба/ основан на анализе графика прослеживания понижения во времени, построенного в координатах $S - \lg t$, на котором выделяется точка перегиба, время наступления которой характеризует равенство расходов, поступающих в скважину непосредственно из опробуемого горизонта и за счет перетока через разделяющие слои из соседних горизонтов.

Метод Хентуше II основан на анализе угловых коэффициентов прямых Ct , определенных по графиком прослеживания понижения

во времени (в координатах $S - \rho_g t$), которые построены для нескольких наблюдательных скважин.

Метод Хантуша Ш² - метод эталонной кривой $W(\tau)$, основан на сравнении фактического графика прослеживания разности установившегося (S_m) и текущих понижений (S_t) на различные моменты времени - график в координатах $\rho_g(S_m - S_t) - \rho_g t$ - с графиком эталонной кривой, построенной в том же масштабе в координатах $\rho_g(W(\tau) - \rho_g(\tau))$, где $\tau = \frac{\alpha t}{r^2}$.

Перечисленные методы позволяют использовать весь период наблюдений, включая установившееся и не установившееся движение. Ввиду того, что в основе методов лежат решения Хантуша-Джейкоба, рассчитанные по ним параметры должны быть близки (расхождения не превышать 5-20%).

Для установившегося движения, описываемого зависимостями (4 и 5), разработаны следующие методы.

Метод эталонной кривой $K_0(X) - X$ основан на совмещении графика площадного прослеживания в координатах $\rho_g S - \rho_g t$, построенного по данным понижений не менее чем в трех скважинах, с графиком эталонной кривой $\rho_g K_0(X) - \rho_g X$, построенном в том же масштабе.

Метод площадного прослеживания, основанный на зависимости (3), аналогичен методу того же названия, базирующемуся на решении Тейса-Джейкоба для условий квазистационарного и установившегося режимов движения.

Метод интегральных соотношений, предложенный Т.И.Баренблаттом и разработанный для условий перетекания В.А.Мироненко и Л.И.Сердюковым (1968), имеет в основе приближенное решение, которое позволяет уточнить параметр k_m , рассчитанный по формуле Дюпюи, и определить a и B .

Метод интегральных преобразований основан на замене функции - оригинала S для нестационарной краевой задачи, функцией - изображением для более простой ("стационарной") задачи путем преобразования Лапласа-Карсона или Лапласа (Дулькито, 1986; Мироненко, Шестаков, 1978).

Методы (способы) Джейкоба или методы линейной анаморфозы, основанные на зависимости Тейса-Джейкоба, применительно к на-

порному пласту рекомендуются для оценки параметров при наличии простых прямолинейных полулוגарифмических графиков временного, площадного и комбинированного прослеживания (Боравский, Самсонов, Извин, 1979), а при сложных закономерностях — совместно с методом интегральных соотношений.

Перетекание из водоносных пластов с изменяющимся напором

Такая схема наблюдается при соизмеримой проводимости двух водоносных горизонтов — опробуемого и питающего.

Решение для случая с равными коэффициентами пьезопроводности обоих пластов получено Ф.М.Бсчевером, Н.Н.Далшиним (1969). Определение параметров основано на анализе графиков временно-го прослеживания в координатах $S - \lg t$, на которых должны выделяться два этапа:

первый характеризуется приуроченностью точек зависимости к прямой линии, угловый коэффициент которой C_1 отражает процесс снижения уровня в опробуемом горизонте и его проницаемость, что позволяет определить по известным зависимостям $k\mu$, α ;

второй этап характеризуется приуроченностью точек зависимости к прямой линии, угловый коэффициент которой отражает процесс снижения и суммарную водопроводимость обоих пластов, что позволяет определить $k\mu = k\mu_1 + k\mu_2$ и отдельно $k\mu_2$.

При наличии пьезометров в каждом слое и их одинаковом положении относительно центральных скважин и при последовательном опробовании каждого пласта В.М.Шестаковым (1983) предложено несколько способов.

Способ анализа понижений $\bar{S}$, приведенных к проводимости нижнего пласта, которые в этом случае должны иметь одинаковые выражения:

$$\bar{S}' = \bar{S}'' = \frac{1}{4\pi k\mu} = \bar{S}'_1 \theta_1 + \bar{S}'_2; \text{ при } \theta_1 = \frac{k\mu_1}{k\mu_2}. \quad (6)$$

Обработка данных откачки этим способом основана на подборе величины θ_1 для того, чтобы на графике комбинированного прослеживания в координатах $\bar{S} - \lg t / \tau^2$ точки $\bar{S}'$ и $\bar{S}''$ накладывались на одну линию.

Способ анализа разности понижений в двух пластах, зафиксированных в процессе откачки из одного пласта в пьезометрах, расположенных на одинаковом расстоянии от центральной. При откачке из нижнего пласта разность понижений $\Delta S''$ в каждом пласте в одном сечении описывается фундаментальным уравнением Хантуша-Джейкоба для условий перетекания, что позволяет применить метод эталонных кривых Хантуша-Джейкоба на ровном основании с фактическим графиком прослеживания в координатах $\Delta S'' - \rho g t$ и дает возможность определить $k m_2, \alpha, B$.

Способ интегральных преобразований по Ламлау-Карсону рассчитан на обработку данных понижений в пьезометрах, расположенных вблизи центральной, для которых значения аргументов $r/B < 0,2-0,3$, что позволяет использовать зависимость (5) для установившегося движения. Обработка ведется с использованием графика площадного прослеживания в координатах $\bar{S}_p - \rho g t$ или $\bar{S}_p/Q_p - \rho g t$ при различных значениях параметра преобразования, для каждого из которых точки зависимости ложатся на прямую линию, отсекающую на оси $\rho g t$ величину $\rho g R_p$. На построенном затем графике в координатах $\xi - P$, где $\xi = (1, 12/P_p)^4/P$, опытные точки должны лечь на прямую линию, отсекающую на осях

$$\xi = (\mu_1 + \mu_2)^{\chi} / T_1 T_2 \text{ и } P_0 = -(\mu_1 + \mu_2)^{\chi} / \mu_1 \mu_2,$$

где μ_1, μ_2 - коэффициенты водоотдачи пластов; $\chi = K_p/m_p$ - коэффициенты перетока.

Имеется решение и для случая, когда верхний пласт является безнапорным.

Рекомендации по интерпретации откачек, изложенные Мироненко, Шестаковым (1978) и расширенные в работе Шестакова (1983), относятся к случаю двух взаимодействующих через разделяющий слабопроницаемый слой пластов, один из которых опробуется опытной откачкой. Понижения в обоих пластах под влиянием откачки фиксируются в наблюдательных скважинах, расположенных в одних сечениях попарно на каждый пласт на различном расстоянии от опытной.

Рекомендуется вести расчеты следующими методами:

площадное прослеживание по ближайшим скважинам, оборудованным фильтрами на опробуемый водоносный горизонт;

временное прослеживание, в основе которого лежит возможность определения параметров опробуемого пласта по первому этапу снижения и суммарной характеристике параметров системы в целом – по конечному этапу снижения. Уклоны прямых в этом случае на конечном участке должны быть одинаковы при постоянном значении разности понижений в наблюдательных скважинах, оборудованных фильтрами на каждый водоносный пласт;

способ эталонной кривой $W(u, \tau) - I/u$ для анализа разности понижений в двух пластах при опробовании одного из пластов в случае снижения уровня в питающем слое или непосредственно понижений в опробуемом пласте, согласно зависимости (I) в случае сохранения неизмененного напора в питающем слое;

способ интегральных преобразований, который вследствие сглаживания возможных ошибок замеров при замене оригиналов понижения их изображениями, по мнению В.М.Шестакова, является менее субъективным.

Аналогичные рекомендации по обработке результатов опытно-фильтрационных опробований многослойных толщ изложены в работе Боровского, Самсонова, Язвина (1979). Основной упор делается на применение способов Джейкоба (временное, площадное, комбинированное прослеживание) с дополнительным определением параметра перетекания методом эталонных кривых Хантуша-Джейкоба. Среди методов Джейкоба преимущество отдается способу комбинированного прослеживания.

Уточнения и дополнения к основным решениям и методикам содержатся в отдельных статьях, рассматривающих данный тип водоносного горизонта.

Так, в статье Bruce Hunt (1977) представлен бесконечный ряд функции перетекания Хантуша-Джейкоба для малых значений аргумента $\bar{u}$, а у Саве С.М. и Адиго J.C. (1977) – численные значения этой функции для величин аргумента $\bar{u} - 0,01-0,1$, которые практически не отличаются от широкого диапазона этих значений (Де Уист 1969; Kruseman, Ridder, 1970). Выполненные аналитические решения для понижения уровня при от-

ячие из несовершенной скважины, опробующей один из слоев двухслойного пласта (Жавандел, Уантерспун, 1983 г.), позволив авторам рекомендовать замену двухслойной системы эквивалентным однородным водонесным горизонтом с обобщенными параметрами $T_{ед} = T_1 + T_2$ и $S_{ед} = \frac{S_{s1} \cdot h_1 + S_{s2} \cdot h_2}{h}$. В.М.Шестаковым, Т.В.Азаровой (1986) для обработки данных ОФР, проводимых в пластах с перетеканием из соседних пластов, предложены дифференциальные способы, основанные на анализе логарифмических производных кривой временного прослеживания понижения уровней. Они представляют интерес для обработки снижения уровня в центральной скважине, для которой:

$$G = \frac{Q}{4\pi} \exp\left(-\frac{at}{B^2}\right), \quad \text{где } G = \frac{\partial S}{\partial \rho_{nt}}. \quad (7)$$

Предлагается использовать график $\rho_{nt} G$ от t ($\rho_{nt} G = \rho_{nt} \frac{\Delta S}{\Delta \rho_{nt}}$), на котором по точке G_c , отсекаемой прямой по оси $\rho_{nt} G(t=0)$, можно получить $T = Q / 4\pi G_c$, а по уклону прямой — a/B^2 .

Следующий предлагаемый прием численного дифференцирования основан на предварительной аппроксимации кривой временного прослеживания полиномом вида:

$$S = a_0 + a_1 \rho_{nt} + a_2 \rho_{nt}^2 + \dots + a_n \rho_{nt}^n. \quad (8)$$

Параметры трехпластового потока, разделенного двумя слабопроницаемыми слоями, по данным ОФР, определены в работе И.К.Невечери и И.В.Авилиной (1988). Применен способ идентификации геофильтрационных параметров на основе минимизации функции многих переменных. В качестве расчетных взяты схемы неограниченного пласта, двухпластового потока с постоянным (стационарный и нестационарный режимы) и изменяющимся уровнем в соседнем пласте (нестационарный режим), трехпластовый поток (нестационарный режим), описываемый численно-аналитическим решением В.М.Шестакова и Г.Д.Григоринной. Результаты по всем схемам хорошо согласуются между собой, но лишь последний позволяет оценить все параметры трехпластового потока при опробовании одного пласта и наличии замеров понижений во всех трех пластах. Интерес представляют решения О.В.Чеботаревой (1993) для

двух типов двухслойного пласта, первое из которых, по сравнению с решением М.Хантуша, обосновано в более широком временном интервале и является более точным приближением к истинным значениям понижений (параметров), а второе дает аналогичные результаты по сравнению с решением Н.Н.Лапшина (1979).

Расчетам параметров многослойных толщ численными методами посвящены работы Г.Д.Раткович, В.М.Шестакова (1987), В.Л.Веселовой, Г.Д.Раткович (1987). Составленные ими программы отражают радиальный потток, формируемый в процессе откачки из одного из пластов многопластовой системы с учетом взаимодействия с другими слоями через разделяющие слои (программы "FILTER", "ANML" МГУ, соответственно для ЭВМ типа ЕС и ПЭВМ). Наиболее полный набор возможных гидродинамических схем опробуемых водоносных пластов для различных граничных условий предусмотрен разработанной О.А.Дульките (1982) программой "Тидпар", которая основана на выборе наиболее приемлемой схемы с установлением минимума функционала расчетных и фактических понижений в процессе многократной итерации на ЭВМ типа ЕС.

Схема III – безнапорный водоносный горизонт

При откачке из безнапорных пластов, питание которой осуществляется за счет емкостных запасов, наблюдается замедление проявления гравитационной водоотдачи, что объясняется В.М.Шестаковым (1974, 1978) влиянием капиллярной каймы или покровного слоя для двухслойного пласта. Этот процесс отражается на графиках временного прослеживания с выделением трех этапов, которые описываются зависимостями:

- | | | |
|-----------------------------------|---|--|
| I этап (упругий режим) | - уравнение Хантуша-Джейкоба
зависимость (3) | |
| II этап (ложностационарный режим) | - зависимости (4 и 5) | |
| III этап (гравитационный режим) | - уравнение Боултона | |
- $$S = \frac{Q}{4\pi k_p h} W_u(u, \gamma/\beta), \quad (9)$$

где $W_u(u, \gamma/\beta)$ – специальная функция Боултона для условий

гравитационного режима; $B = \sqrt{\frac{km}{\mu}}$; I/μ - коэффициент запаздывания проявления гравитационной водоотдачи.

В пределах этого этапа при наступлении квазистационарного режима функция Боултона переходит в логарифмическую функцию:

$$W_B(u_B, \tau/\nu) \rightarrow \rho_n \frac{2.25 \alpha t}{\tau^2}.$$

Процесс снижения уровня здесь должен подчиняться зависимости Тейса для условий гравитационной водоотдачи:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W\left(\frac{\tau^2}{4\alpha t}\right) \text{ или } S = \frac{Q}{4\pi km} \rho_n \frac{2.25 \alpha t}{\tau^2}. \quad (10)$$

На основе этих зависимостей для обработки ОФР предложены методы (Мироненко, Шестаков, 1978; Шестаков, Башкатов, 1974; Kruseman, Ridder 1970), которые частично дублируют методы, обоснованные для условий перетекания. Ниже приводится перечень методов расчета для данной схемы.

I этап - упругий и ложностационарный режимы. Применяются методы эталонных кривых Хантуша-Джейкоба, три метода Хантуша

II этап - ложностационарный режим. Возможно использование метода эталонной кривой $K_0(x) - x$, площадного прослеживания.

III этап - гравитационный режим.

Метод эталонных кривых Боултона основан на сравнении фактических кривых прослеживания понижения во времени, построенных в координатах $\rho_g S - \rho_g t$, с эталонными кривыми Боултона, построенными в том же масштабе в координатах $\rho_g W_B(u_B, \tau) - \rho_g u_B$ и позволяет рассчитать km и α . Применяется совместно с методом эталонных кривых Хантуша-Джейкоба.

Способы эталонных кривых $W(\tau, \bar{\tau}) - 1/\mu$ и $W(\tau, \bar{\tau}, M^*/M)$ аналогичны предыдущему методу. Функции $W(\tau, \bar{\tau})$ и $W(\tau, \bar{\tau}, M^*/M)$ близки функции Боултона и уточняют ее значения при различных значениях $\frac{M + M^*}{M^*} = 6,5; 30; 34; 100$. Способы позволяют рассчитать $km \cdot B \cdot \mu$.

При выходе на конечных участках графиков точек зависимости в координатах $S - \rho_g t$ по нескольким наблюдательным скважинам на параллельные прямые, что свидетельствует о подчинении про-

цесса снижения зависимости (2), возможно использование способов Джейкоба (временное, площадное, комбинированное прослеживание).

Рекомендации в работе (Мироненко, Шестаков, 1978) предлагается применять при обработке понижений в совершенных и несовершенных пьезометрах. При использовании понижений в совершенных пьезометрах рекомендуются:

способы площадного прослеживания и эталонной кривой $K_0(X)-X$. Для анализа используются понижения в точке перегиба, фиксирующей переход от ложностационарного к гравитационному режиму. Этими способами при наличии не менее трех наблюдательных скважин определяется водопроводимость пласта;

зависимость Дюпюи используется при наличии двух наблюдательных скважин для предварительного определения водопроводимости;

метод интегральных соотношений по конечным понижениям помогает уточнить полученное значение Km ;

способы эталонных кривых Хантуша-Джейкоба рекомендуются для получения Km и a^* при обработке I этапа упругого режима графиков прослеживания; эталонных кривых Боултона - для определения Km , B, M, Q в пределах III этапа гравитационного режима.

Рекомендации Боровского и др. (1979) основаны на том, что при откачке из безнапорных пластов графики прослеживания имеют участки, описываемые уравнениями Тейса-Джейкоба. Применение здесь методов Джейкоба связано с необходимостью поиска представительного расчетного участка, для которого возможно использование критериев и приемов (способы временного, площадного и комбинированного прослеживания при квазистационарном режиме), применяемых для условий напорного водоносного горизонта.

Решение Боултона, положенное в основу перечисленных методов впоследствии неоднократно подвергалось ревизии. В частности, Neuman (1972, 1975) показал, что аналогичный характер графиков прослеживания получается при принятии условий вертикальной анизотропии пласта ($K_z \neq K_r$), что дало основание автору усомниться в реальности фактора изменчивости

водоотдачи. В обзоре методов обработки данных откачек в безнапорных условиях Walton (1978) исходит из теоретических и экспериментальных результатов, подтверждающих постоянство водоотдачи, незначительную роль капиллярной зоны и определяющий фактор анизотропии. Это позволило рекомендовать в качестве основной зависимости решение Ньмана (Neuman, 1975) для совершенной скважины без учета ее емкости, в котором учтена анизотропия пласта в горизонтальном и вертикальном направлениях. Функция $W(u_d, u_v, \beta)$ отражает разнообразие семейства кривых, вызванное неоднородностью пласта ($\frac{K_z}{K_r} = 0,1-10,0$) в пределах конкретных кривых, отражающих замедление проявления гравитационной водоотдачи с выявлением этапов, соответствующих эталонным кривым типа А Хантуша-Джейкоба и типа В Боултона (Boulton, 1963).

Численный анализ опытной откачки в неограниченных безнапорных пластах и сопоставление его результатов с аналитическими решениями Боултона приведены в работе Rushton, Chan (1977), доказавшей несущественное различие результатов и оценившей возможность численной дискретной модели для интерпретации результатов откачки с целью установления геофильтрационных параметров пласта.

Сравнительное исследование различных методов определения гравитационной водоотдачи неглубоких песчаных и водоносных горизонтов приведено в работе Nwankwer и Cheryu (1984), где сравниваются коэффициенты гравитационной водоотдачи, полученные лабораторным способом, а также рассчитанные по данным кратковременной и продолжительной откачек объемно-балансовым методом и методами Ньмана и Боултона. Утверждается, что реальной является водоотдача, полученная лабораторным способом (0,3), которая может быть подтверждена объемно-балансовым методом при длительных откачках (при фактической продолжительности откачки 65 ч получено повышение водоотдачи от 0,07 до 0,25). Величина гравитационной водоотдачи, определенная методами эталонных кривых Боултона и Ньмана, считается нереальной и заниженной (0,07-0,08), что по мнению авторов, показывает неадекватность положенных в их основу моделей

поведения водоносного горизонта. Делается вывод о необходимости создания модели, которая учитывала бы как влияние вертикальных гидравлических градиентов в насыщенной зоне, так и запаздывание водоотдачи над уровнем воды.

Впоследствии исследования, выполненные Kadi и Brutsaert (1986), доказали на примере сравнения решений Боултона с численными решениями уравнений Ричардса и Буссинеска большую точность решения Боултона для длительных периодов времени и совпадение решений — для коротких. Достоверность решения Боултона доказана и для двухслойных пластов (пласт, перекрытый слабопроницаемыми отложениями), в котором нижний, опробуемый, слой рассматривается как напорный, а при откачке уровень опускается ниже его кровли.

Так, Moench, Prickett (1972), рассматривая откачку из такого пласта, в основу решения положили ступенчатую функцию изменения водоотдачи ~~упругой~~ до гравитационной. Полученные в результате решения кривые зависимости понижения от времени занимают промежуточное положение между эталонными кривыми Тейса соответственно для упругого и гравитационного режима и близки к понижениям, описываемым с учетом замедления проявления гравитационной водоотдачи M_c решением Боултона. К аналогичным результатам пришли Bhal'd и Naleraska (1976), подтвердившие аналитические решения численными. Для постоянных

M_c и T модель сходится с решением Тейса, а при задании M_c ступенчатой функции при постоянном T она дает результаты, аналогичные аналитическому решению Moench и Prickett (1972) и позволяет получить решение с учетом эффекта замедленной водоотдачи в случае строго безнапорного потока (Boulton, 1963).

Степанищев С.Л. (1991 г.) на основе численного моделирования опытных откачек из безнапорных водоносных горизонтов речных долин Центрального Казахстана пришел к следующим выводам:

изменение уровня в основном пласте наиболее чувствительно к изменению параметров K_1/K_2 и M_1/M_0 ;

процессы влагопереноса в осушаемой зоне слабо влияют на ход формирования воронки депрессии в основном пласте и, следовательно, на определение водопроводимости, которую можно

нравить общепринятыми способами;

в связи с неустановившимися процессами перераспределения в зоне неполного насыщения при перемещении уровня свободной поверхности водоотдача не сразу достигает предельных значений, и время стабилизации μ определяется в зависимости от гидрофизических характеристик и схем строения.

На основании этого он предлагает для условий безнапорных водоносных горизонтов с коэффициентами фильтрации 10-100 м/сут при определении μ ориентироваться на автоматизированный способ на основе схемы двухпластного пласта и объемно-балансовый метод (ОБМ), преимуществом которого, по мнению автора, является отсутствие требований априорного использования какой-либо расчетной геофильтрационной модели откачки.

Схема IV - полуограниченный безнапорный водоносный горизонт с границей постоянного напора

Для этой схемы питание откачки через некоторый промежуток времени полностью осуществляется за счет привлекаемых ресурсов - речного стока. По данным откачек, из скважин, расположенных у реки, обычно определяются водопроводимость k_m и сопротивление ложа водоема L .

При откачке на графиках прослеживания понижения во времени выделяются четыре этапа, из которых первые три аналогичны этапам для безнапорного пласта (упругого, ложностационарного и гравитационного режимов, а четвертый (стационарный) обусловлен стабилизацией уровней под влиянием реки.

Основной зависимостью, описывающей процесс снижения под влиянием откачки применительно к напорному пласту, является:

$$S = \frac{Q}{4\pi k_m} \left[W\left(\frac{r^2}{4at}\right) - W\left(\frac{\rho^2}{4at}\right) \right] = \frac{Q}{4\pi k_m} W(\beta^2 u), \quad (II)$$

переходящая при квазистационарном режиме в формулу Форхгеймера:

$$S = \frac{Q}{2\pi k_m} \rho_n \frac{\rho}{r}, \quad (I2)$$

где ρ – расстояние до зеркально отраженной скважины, м;
 l – расстояние до опытной скважины, м;

$$\rho = \sqrt{(2L - x)^2 + y^2}, \quad \beta = \frac{\rho}{l};$$

x, y – координаты точки пласта, в которой определяется понижение, относительно опытной скважины; L – расстояние опытной скважины до реки, м.

При несовершенной связи реки с подземными водами ($\Delta L \neq 0$) в расчет ρ вводится величина ΔL

$$\rho = \sqrt{[2(L + \Delta L) - x]^2 + y^2} \quad (13)$$

Методы расчета параметров ($KM, \Delta L$) по этой схеме основаны на анализе конечных понижений в пьезометрах, зафиксированных на IV этапе откачки.

Способ площадного прослеживания основан на анализе графика в координатах $S - \lg \rho/l$. При $\Delta L = 0$ точки зависимости ложатся на прямую линию, выходящую на начало координат. Координаты любой точки позволяют определить KM , при использовании зависимости (12). При $\Delta L \neq 0$ водопроницаемость определяется по понижениям в скважинах, расположенных по лучу, параллельному реке, а величина ΔL – подбором по соотношению понижений в двух наблюдательных скважинах. Для упрощения подбора имеются решения и зависимости В.М.Шестакова, Ю.О.Зеегофера (1968), В.М.Шестакова (1981), которые позволяют определить ΔL с учетом ширины реки. Обработку данных откачек у реки при однослойном строении горизонта рекомендуется (Мироненко, Шестаков, 1978) проводить, используя установившееся понижение уровня, зафиксированное в конце откачки при убеждении в истинности стабилизации.

В качестве основного рекомендован метод площадного прослеживания (Боревский и др., 1979, 1985) в координатах $S - \lg \rho/l$, который позволяет определить водопроницаемость пласта, и путем подбора – величину ΔL .

При использовании метода аналогичного названия в координатах $S - \lg l$ рекомендуется (Боревский и др., 1979) использо-

вать только те скважины, которые отвечают площадному ограничению $\xi = \frac{\tau}{L + \Delta L} \leq 0,4-0,5$. В частности, этим объясняются предложения по расчету КП по параллельному реке створу наблюдательных скважин, которые отвечают этому критерию, в методах оценки ΔL , разработанных В.М.Шестаковым (1983).

В.М.Шестаковым, И.К.Невечерей (1991) приведены обоснование и сравнительная оценка различных способов интерпретации опытных откачек у реки с помощью ЭВМ. Рекомендуется при четырехэтапном графике прослеживания понижения во времени для определения параметров водопроводимости и сопротивления русла ΔL использовать понижения стационарного, четвертого этапа, применяя в качестве расчетных зависимости В.М.Шестакова, Ф.М.Бочверера для узких и широких рек в виде графического способа. При автоматизированном способе обработки на ЭВМ отмечается необходимость стремления к упрощению решения прямой задачи путем уменьшения числа одновременно определяемых параметров. Так, в ложностационарном режиме предлагается ограничиться определением водопроводимости и коэффициента перетока χ_0 , а на стационарном этапе — χ_0 и ΔL .

Сопоставительный анализ результатов расчета различными способами (графоаналитический, автоматизированные неявный и явно-неявный, способ последовательных расчетов) показал хорошую сходимость параметра водопроводимости, оцененного всеми способами и зависимость χ_0 от способа определения при сохранении порядка цифр этого параметра. Это послужило основой смелых рекомендаций по рациональной схеме размещения наблюдательных скважин, которая ограничивается двумя скважинами (вблизи реки и центральной), расположенными по перпендикулярному к реке лучу.

Степанищев С.Л. (1991 г.) отмечает, что в результате сложного взаимодействия таких факторов, как динамика гравитационной водостдачи, вертикальных сопротивлений потока, профильной неоднородности водоносного пласта, этапы режима оказываются сглаженными, а уверенное выделение стационара осложнено влиянием колебаний уровня воды в реке. Он делает вывод об отклонении хода фильтрационного процесса от схемы изолированного

напорного пласта и вследствие этого о неприменимости способов Джейкоба и эталонной кривой Тейса для оценки проводимости пласта. Для этой цели им рекомендуется ориентироваться на обработку стационарного режима автоматизированными способами (В.М.Шестаков, И.К.Невечеря, 1991 г.). Оценка параметра ΔL вследствие его низких значений становится второстепенной задачей.

А.Л.Язвин (1993), рассматривая вопросы интерпретации приречных скважин, опробующих аллювиальную водоносную толщу большой мощности, в качестве основного метода рекомендует использовать численно-аналитическое моделирование (В.М.Шестаков, 1988 г.), в котором решение нестационарных задач осуществляется с помощью метода интегральных преобразований, а численные методы применяются при решении нестационарных и стационарных задач для нахождения собственных значений исходной матрицы с использованием решений для бесконечного числа слоев в матричной форме для неограниченного в плане радиального потока и схемы с рекой, полученных В.Л.Зеселовой. Им обоснованы требования к дробности разбивки модели по оси r . Обработку предлагается проводить способом последовательного расчета параметров. По начальному этапу, в течение которого отсутствует влияние реки на получаемые величины понижений, определяются параметры водоносного горизонта путем решения обратных задач по радиальной схеме потока, а расчет коэффициента перетока подрусловых отложений проводится по данным конечного стационарного этапа. Рекомендуемая схема опробования сводится к проведению опытных откачек из трех интервалов – эксплуатируемого, верхнего и нижнего с последовательным определением их характеристик и связи с рекой через коэффициент перетока.

Выводы по анализу обзора методов оценки параметров

На основе вышеизложенного обзора представляется необходимым отметить следующее:

I. В основе всех методик лежат фундаментальные решения, которыми учтены или сработка емкости водоносного горизонта за счет упругих (напорный пласт) и гравитационных (безнапор-

ний пласт) запасов подземных вод, или перетекание сложившихся запасов смежных водоносных пластов (напорный пласт с перетеканием), или привлечение поверхностных водных ресурсов из реки (приречные участки развития безнапорных водоносных горизонтов), т.е. применяется ограниченное число расчетных схем, не отражающих многообразия природных условий.

И. Многочисленные попытки получить новые решения чисто математическими приемами, а не на основе раскрытия и уточнения сущности гидродинамических процессов, возникающих при отборах из горизонтов различных типов, не дали и не могли дать положительных результатов. Они не способствовали повышению достоверности оценки параметров, так как не выходили за рамки известных теоретических зависимостей.

В. Основанные на этих решениях методики и способы расчета можно сгруппировать следующим образом:

аналитические расчеты по конечным зависимостям (Дюпи, Форхгеймер, Тейс, Хантуш и др.),

графоаналитические – аналитические расчеты на основе анализа графиков прослеживания понижений во времени и в пространстве с использованием методов линейной анаморфозы (способы Джейкоба) или эталонных кривых (Тейса, Хантуша-Джейкоба, Боултона),

численно-аналитические – аналитические расчеты совместно с решением обратных задач по оценке параметров на численных моделях, отражающих различные типы водоносных горизонтов (безнапорный, напорный, слоистая толща),

численные – решение обратных задач на численных моделях для различных типов водоносных горизонтов и характера граничных условий.

4. Рассчитанные этими методами параметры близки к реальным только при соответствии выбранной расчетной схемы конкретному типу опробуемого водоносного горизонта. При невыдержанности этого критерия наблюдается существенное отступление расчетных значений параметров от достоверных. Результаты, полученные численными методами, в отдельных случаях приводят к некоторому сглаживанию рассчитанных параметров, однако, не выходят за рамки возможностей точных теоретических решений, выведенных

для конкретного типа водоносного горизонта. Вследствие этого численные решения не всегда имеют преимущества перед аналитическими и графоаналитическими, хотя и расширяют возможности анализа опытных данных.

5. При оценке параметров емкости предпочтение в отдельных случаях (Nwankwe, Cherry, Gillham; 1984) отдается результатам лабораторных определений водосодержащих пород и объемно-балансовому методу (ОБМ). Следует подчеркнуть два положения, не позволяющих безоговорочно согласиться с этими выводами:

при лабораторных исследованиях невозможно сохранить природную структуру породы, вследствие чего полученные по ним результаты, как правило, существенно завышены;

рост водоотдачи по результатам расчета объемно-балансовым методом вполне оправдан, но может отражать не истинное замедление ее проявления, а начало стабилизации понижений в конечной части графика под влиянием каких-либо факторов питания от качки. При более продолжительной откачке и наступлении полной стабилизации уровней применение объемно-балансового метода приведет к величинам, значительно превышающим водоотдачу, определенную лабораторным способом. При наступлении стабилизации водоотдача может достигнуть фантастических величин (до бесконечности).

Кроме того, при оценке μ объемно-балансовым методом рассчитанные объемы извлеченной воды в пределах осушенной части депрессионной воронки имеют существенный процент ошибки вследствие, как правило, недостаточной информации о развитии воронки депрессии и ее асимметричности. Необоснованность применения ОБМ подтверждает простой аналитический расчет изменения водоотдачи по результатам откачки, питание которой через некоторый промежуток времени полностью формируется за счет естественного потока подземных вод при стабильной воронке депрессии, не увеличивающей своего объема при любой продолжительности откачки. При реальной водоотдаче $\mu = 0,1$, расходе откачки $864 \text{ м}^3/\text{сут}$ за четверо суток сформирована воронка депрессии объемом 34560 м^3 . Увеличение объема отбираемой во-

ны при отношении его к тому же объему воронки депрессии привели (без учета этого фактора) к увеличению рассчитанных значений водоотдачи через 10 сут - до 0,25, через 20 сут - до 0,6, а через некоторое время (40 сут и более) - она превращается в 1.

6. Делаясь в настоящее время (Neuman, 1972, 1975; Walton, 1978) для безнапорных горизонтов упор на анизотропию пласта (различие коэффициентов фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях), которая рассматривается в качестве одной из причин разнообразия понижений при откачках из таких пластов, хотя, безусловно, может объяснить факт различия в понижениях, но не является основной причиной отступления наблюдаемых процессов снижения уровней от теоретических.

Приоритетность учета фактора анизотропии при откачках обосновывается следующими доводами:

при понижениях, достигаемых в процессе опытных откачек, особенно из совершенных скважин, роль анизотропии пласта в горизонтальном и вертикальном направлениях незначительна и практически не проявляется. Главенствующая роль принадлежит горизонтальной составляющей коэффициента фильтрации;

в условиях изложенного выше процесса формирования флювиальных плиоцен-четвертичных отложений максимальная анизотропия может проявляться преимущественно в отложениях, не подверженных длительной механической переработке их водным потоком, т.е. в отложениях пролювиального или пойменного генезиса, приуроченных к опущенным тектоническим блокам и являющихся слабопроницаемыми. Для русловых отложений, которыми представлены основные продуктивные водоносные горизонты, характерна высокая степень отсортированности отложений водным потоком и относительная изотропность без существенного преимущества одной из составляющих коэффициента фильтрации.

7. Приведенная в табл. 2 возможная структура формирования расходов откачки из водоносных горизонтов различного типа показывает, что именно неучет этих составляющих является основной причиной получения по результатам расчета нереальных параметров и, если для напорных и напорных с перетеканием пла-

тов эти помехи, вызванные игнорированием отдельных составляющих, несущественны, то для безнапорных водоносных горизонтов именно они определяют характер хода снижения уровней при откачке, что и приводит, в целом, к значительному, иногда непредсказуемому, искажению рассчитанных параметров.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОТРАЖЕНИЯ В РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ И МЕТОДИКАХ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХОД СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ПРИ ОТКАЧКАХ, И СПОСОБЫ ИХ УЧЕТА

Составляющие понижения уровня воды при ОФР

При откачке на понижение уровня воды внутри скважины влияет ряд факторов, определяющих абсолютную величину понижения. Общее суммарное понижение в этом случае может быть приближенно записано в виде:

$$S_c = S_c + \sum_{i=1}^n \Delta S_n + \Delta S_{нА} + \sum_{k=1}^n \Delta S_k, \quad (I4)$$

где S_c - понижение в совершенной скважине при ее работе в неограниченном напорном или безнапорном пласте; $\sum_{i=1}^n \Delta S$ - сумма дополнительных срезов или повышений уровня, отражающих условия питания откачки - влияние непроницаемой границы $\Delta S_{гр}$, питающей границы реки $\Delta h_{гр}$, перетекания через разделяющий слой $\Delta h_{пер}$, естественного потока $\Delta h_{еп}$, изменения условий питания на границах в процессе откачки ΔS_p , т.е.

$$\sum_{i=1}^n \Delta S_n = \Delta S_{гр} - \Delta h_{гр} - \Delta h_{пер} - \Delta h_{еп} \pm \Delta S_p, \quad (I5)$$

$\Delta S_{нА}$ - дополнительные срезы уровня, вызванные неоднородностью пласта в разрезе; $\sum_{k=1}^n \Delta S_k$ - сумма дополнительных понижений, отражающих конструктивные особенности скважины, фильтра и прифилтровой зоны и определяющих несовершенство скважины по степени вскрытия $\Delta S_{св}$ и характеру $\Delta S_{хв}$, т.е.

$$\sum_{k=1}^n \Delta S_k = \Delta S_{св} + \Delta S_{хв}. \quad (I6)$$

Рассмотрим влияние каждого фактора и возможность реализации его учета при расчете геофильтрационных параметров опробуемого пласта исходя из современной изученности процессов формирования воронок депрессии при откачках из скважин и состояния теории интерпретации ОФР.

Понижения в скважине (совершенной по степени и характеру неупругости) в неограниченном пласте S_c отражает процесс отбора при откачке емкостных запасов пласта (упругих - при опробовании напорного пласта и гравитационных - безнапорного). Для этих типов водоносного горизонта распределение понижений описывается фундаментальными решениями Тейса (I напорный пласт) и Боултона (II безнапорный пласт) для условий неустановившегося движения, а форма кривой депрессии и распределение понижений по площади на различные моменты времени - зависимостью Дюпюи для стационарного режима. Решения Тейса и Боултона отражают два крайних состояния напряженности пласта - напорный, располагающийся на больших глубинах, находится в предельно упругом состоянии под влиянием геостатического давления от веса вышележащих отложений, безнапорный не испытывает влияния этого давления и характеризуется минимальной напряженностью, что при проведении откачек обуславливает различный вид графиков временного проследивания (одноэтапный - для напорного пласта и трехэтапный - для безнапорного, гл. 3).

Влияние геостатического давления как одного из основных факторов, определяющего состояние упругости пласта, обуславливает степень напряженности пласта на различных глубинах, характер изменения уровней при их опробовании и не ограничивается закономерностями, отмеченными для рассмотренных выше типов.

Сумма дополнительных срезов или повышений уровня, отражающих условия питания откачки и граничные условия пласта $\sum_{i=1}^n \Delta S_n$.

Здесь необходимо выделить две группы.

Группа факторов, отраженных в имеющихся решениях ($\Delta S_{гр}$, $\Delta h_{гр}$, $\Delta h_{ср}$), по учету границ пласта в плане и разрезе, таких, как уравнения Форхгеймера для скважины, расположенной у непроницаемой границы II рода ($Q = 0$); для скважины, расположенной у реки (граница I рода); дополнения В.М.Шестакова

(1963, 1968) для реки (границы III рода). Принцип, положенный в основу вывода этих решений (зеркальное отображение и сложение течений), может применяться для учета любого количества границ (полуограниченные и ограниченные пласты) при использовании зависимостей, отражающих тип водоносного горизонта. К этой же группе можно отнести и уравнение Хантуша-Джейкоба (3), которое учитывает площадное питание откачки путем перетекания через разделяющий слой из смежных водоносных пластов и реализует влияние границ III рода в кровле и подошве опробуемого пласта.

Группа факторов, не нашедших отражения в имеющихся решениях, обусловлена сложностью структуры формирования расхода откачки (табл. 2) — Δh_{en} , ΔS_p :

естественный поток подземных вод, влияние которого реализовано частично решением Хантуша только для безнапорного горизонта, хотя движение подземных вод и, соответственно, наличие потока характерно для водоносных горизонтов и других типов;

привлечение к питанию откачки из безнапорного пласта части выклинивающихся на поверхность подземных вод в виде родникового, площадного, речного дренирования; подземных вод, идущих в естественных условиях на испарение с их зеркала и транспирацию растительностью на участках близкого залегания уровня; местного инфильтрационного питания подземных вод за счет атмосферных осадков, ирригационных вод;

изменение условий питания в процессе проведения откачки (подъем-снижение уровня) под влиянием аналогичного процесса на питающих границах в пределах сформированной откачкой воронки депрессии, а также изменение региональных ресурсов, определяющих динамичность формируемых ими за пределами области питания откачки сложившихся запасов опробуемого пласта.

Дополнительное понижение, обусловленное макронеоднородностью фильтрационных свойств отложений в разрезе $\Delta S_{нА}$, представленном переслаиванием маломощных (2-3 м) слоев, отличных по проницаемости. Предварительное заключение о возможности проявления этого фактора в безнапорных пластах может быть

сделано на основании анализа литологического разреза скважины, что достигается в процессе внимательного документирования бурения ударно-механическим способом или анализом стандартного электрокаротажа скважины (при вращательном бурении).

В процессе откачек выделение этапов снижения уровня, вызванного наличием выдержанных слоев различной проницаемости, может прослеживаться довольно четко. Каждый период снижения уровня в опробуемой скважине в пределах отдельно взятого слоя характеризуется своим темпом снижения, изменяющим интенсивность при переходе уровня из одного слоя в другой. Выделенные на интенсивности снижения уровня этапы отражают уменьшение в процессе откачки среднего коэффициента фильтрации и мощности водоносного горизонта в центре радиального потока, формируемого откачкой.

Сумма дополнительных понижений, отражающих конструктивные неоднородности скважины, фильтра и прифилтровой зоны $\sum_{k=1}^n \Delta S_k$ обусловлена гидравлическим сопротивлением, вызванным степенью вскрытия пласта и расположением фильтра относительно его кровли ξ_1 , и гидравлическим сопротивлением, зависящим от характера его вскрытия ξ_2 , определяемого параметрами фильтра, составом проницаемости прифилтровой зоны и ее изменения при опробовании.

Вопросы оценки этих гидравлических сопротивлений рассмотрены в работах Ф.М.Бочевера (1968 г.); В.М.Гаврилко, В.С.Алексеева (1976 г.); Н.Н.Веригина (1977 г.); Э.А.Грикевича (1978, 1986 гг.); Ю.О.Зеегофера, В.М.Шестакова (1972 г.); Н.Н.Лапшина (1976 г.), А.И.Чарного (1963 г.) и др. Решения представлены в виде аналитических зависимостей, таблиц и графиков применительно к несовершенным скважинам для различных типов пластов.

Срезка уровня, вызванная несовершенством скважины по степени вскрытия, учитывается введением в основные расчетные формулы, описывающие понижение уровня под влиянием откачки на совершенной скважине, поправок на этот вид несовершенства, предложенных Н.Н.Веригиным. Решения рассчитаны на различные варианты положения фильтра относительно кровли и подошвы

пласта, отношения длины фильтров ρ к мощности пласта m , мощности пласта к радиусу скважины r_c - для опытной скважины или расстояния до пьезометров r - для наблюдательных.

Решения Э.А.Грикевича (1986), основанные на уточнении коэффициента зоны существенной деформации потока ϵ для двухпластового горизонта различной проницаемости каждого пласта, и их сравнение с решениями Н.Н.Лапшина (1976 г.) для аналогичного горизонта и Н.Н.Веригина - для однородного пласта показали приемлемую сходимость и правомерность использования для расчета скважин, работающих в условиях двухпластовой системы, хотя решения Э.А.Грикевича наиболее полно отражают фактор неоднородности горизонта.

Срезка уровня, вызванная несовершенством скважины по характеру вскрытия, трудно поддается количественной оценке. Природа формирования определяющего ее гидравлического сопротивления ξ_2 обусловлена фильтром скважины и ее конструкцией; протяженностью пути движения воды по стволу скважины от места ее поступления до положения всаса насоса (ощутимо проявляется лишь в скважинах большой глубины); состоянием пород прифилтровой зоны, в значительной степени зависящей от способа бурения скважины; изменением проницаемости пород этой зоны в процессе проведения ОФР; отклонением от линейного закона фильтрации, что является производным от технического состояния скважины и ее прифилтровой зоны, которые, определяя большую величину сопротивления по характеру вскрытия, вызывают соответственно ламинарный (при малых сопротивлениях) или турбулентный (при больших) характер движения по стволу скважины. Э.А.Грикевич отмечает также зависимость сопротивления по характеру вскрытия от степени вскрытия пласта и считает недостаточно целесообразным их деление по этому принципу.

Учет сопротивлений ξ_1 может быть выполнен с использованием зависимостей Э.А.Грикевича (1986), включающих показатели характеристик коэффициентов фильтрации самого пласта K_1 , прифилтровой зоны K_2 , ее радиуса r_2 , диаметров фильтра D , перфораций d и их числа на l м фильтра. Неопределенность части этих характеристик K_2 , r_2 приводит к чрезвычайной ус-

анализа расчетных величин сопротивления ξ_2 .

Другой прием, учитывающий несовершенство скважины через анализ инерционности сработки в процессе откачки емкости скважины (Ж.Блок, К.Килп, 1977, 1978 гг.; Т.Фински, 1977 г.; Н.Муха, Н.П.Павликова, 1985 г.; И.С.Пашковский, 1967 г. и др.) предусматривает введение в расчетные зависимости поправки на часть расхода, формируемого за счет емкости опытной и стандартной скважин (Mucha, Panlikova, 1986) или представления этих зависимостей с учетом фактора реакции скважины β , отражающей ее инерционность.

Использование этих зависимостей правомерно лишь для скважин большого диаметра (более 1 м) и для реальных диаметров разведочно-опытных скважин согласно критериям, обоснованным В.М. Шостановым (1981), не является обязательным, особенно при больших расходах откачек из высокопроницаемых пластов.

Следует отметить, что все изменения в понижениях, вызванные несовершенством скважины по характеру вскрытия, наиболее ярко проявляются в начальный период откачки (первые минуты), что при анализе ее хода с помощью временных графиков прослеживания понижений позволяет использовать для расчетов части графика, отражающие процесс снижения на сутки и более от начала откачки, в пределах которого инерционность скважины, проявляющаяся в отставании снижения уровня на десятки минут, сведена до минимума масштабом графика (1000 мин. и более).

Таким образом, природа сопротивления по характеру вскрытия, хотя и достаточно ясна, но не подчиняется удовлетворительному математическому описанию вследствие индивидуальности каждой опытной скважины. Дополнительная срезка от влияния этого вида несовершенства может быть оценена только по результатам опробования кустов скважин, включающих определенное количество наблюдательных, как разность фактического понижения в скважине и суммы расчетного понижения, создаваемого работой совершенной скважины в пласте конкретного типа и проницаемости, а также расчетного понижения на несовершенство по степени вскрытия.

Принимая во внимание, что объектом наших исследований, в

основном, являются данные кустовых откачек, проводимых на стадии детальной разведки МВ, несовершенство опытных скважин по характеру вскрытия в работе не рассматривается, хотя при интерпретации ОФР эти особенности его проявления по пьезометрам учитывались на качественном уровне.

Оценивая степень отражения в расчетных зависимостях и методиках основных факторов, определяющих ход снижения уровня при откачках, можно сделать вывод о необходимости доработки теоретических решений, учитывающих:

влияние геостатического давления на состояние водоносного пласта и степень его упругости;

динамичность подземных вод в пласте или наличие естественного потока подземных вод;

сложную структуру формирования расходов откачки для различных типов водоносных горизонтов, особенно для безнапорных.

Влияние геостатического давления на состояние водоносного пласта и степень его упругости

Влияние геостатического давления обусловлено глубиной залегания водоносного горизонта и отражается в величине напора воды над его кровлей, которая является косвенным показателем степени упругого состояния пласта. При рассмотрении условного горизонта у поверхности земли и постепенно погруженного на большую глубину (500 м и более) степень упругости пласта, а следовательно, и его водоотдача, существенно меняются при увеличении глубины залегания. При этом, если этот горизонт изолирован водоупорами в кровле и подошве, т.е. является в принятом представлении напорным, диапазон изменения водоотдачи должен быть очень значительным (от максимальных значений, близких к величине гравитационной водоотдачи вблизи выхода горизонта на поверхность, до минимальных, соответствующих предельным величинам упругой водоотдачи) на больших глубинах залегания пласта, что можно объяснить процессом консолидации пород под действием геостатического давления.

Согласно В.А.Мироленко, В.М.Шестакову (1974), полное нап

жения /природное давление вышележащих пород / σ_n уравновешивается эффективным напряжением σ_z , отражающим силы взаимодействия /сцепления/ скелета пород пласта и нейтральным напряжением σ_n , характеризующим гидростатическое обжатие частиц породы:

$$\sigma_n = \sigma_z + \sigma_n;$$

$$\sigma_n = \sum_{i=1}^n \gamma_{ni} h_{ni}; \quad \sigma_n = \gamma_v \cdot h_k, \quad /17/$$

где γ_{ni}, γ_v - удельный вес соответственно породы и воды;

h_{ni} - мощность каждого i -слоя над кровлей пласта; h_k - напор над кровлей водоносного горизонта;

$$h_k = \sum_{i=1}^n \gamma_{ni} / \gamma_v \cdot h_{ni} - \sigma_z / \gamma_v. \quad /18/$$

Из зависимости /18/ видно, что напор над кровлей водоносного горизонта отражает давление от веса вышележащих пород, сила сцепления /прочности/ пород пласта и характеризует процесс изменения пористости и, как следствие, коэффициента водоотдачи с глубиной. Представляет интерес рассмотрение характера изменения коэффициента водоотдачи с погружением пласта на основе анализа структуры водоотдачи, выраженной через соответствующие коэффициенты упругости пласта /Мироненко, Шестаков, 1974, 1978/.

$$M = h_m = \frac{\gamma_v m}{1 + \xi} \left(\alpha_c + \frac{\xi}{E_v} \right) = \gamma_v m \left(\frac{1}{E_n} + \frac{n}{E_v} \right) = \gamma_v m (\beta_n + n \beta_v) = /19/$$

$$= M_n + M_v,$$

где m - мощность водоносного горизонта, м; ξ - коэффициент пористости; n - пористость; α_c - коэффициент сжимаемости; E_v, E_n - модуль общей деформации /упругости/ воды и породы соответственно; M_v, M_n - составляющие коэффициента водоотдачи, отражающие упругость воды и породы соответственно.

Величина E_v - постоянная / $\approx 2 \cdot 10^8$ кг/м²/. Величина E_n изменяется в зависимости от геостатического давления, определяемого весом вышележащих отложений. Она зависит от глубины погру-

жения пласта, в частности, для гравийно-песчаных пород, залегающих близко от поверхности земли, E_n составляет $1,4-6,10^6$ кг/м² (Спр. по инж. геол. под ред. Чуринова, 1968), примерно на два порядка меньше E_B . Поэтому в двучленной структуре коэффициента водоотдачи (19) она определяет на конечном этапе откачки проявление гравитационной водоотдачи пласта (III этап гравитационного режима при опробовании безнапорных пластов), контролирующей весь ход снижения уровня, за исключением начального периода откачки, когда ход снижения отражает упруго-емкость воды в пористом пространстве пласта. С углублением горизонта E_n увеличивается и на больших глубинах по своим количественным показателям приближается к E_B , характеризуя предельную упругость пласта через коэффициент упругой водоотдачи.

Изменение E_n , согласно закону Гука, подчиняется зависимости

$$E_n = \frac{\sigma_z}{\lambda} \quad (20)$$

где $\lambda = \frac{\Delta m}{m}$ - относительная деформация породы представляет собой отношение величины абсолютного уменьшения мощности пласта Δm к его полной мощности до погружения m и связана с коэффициентом пористости пласта ϵ соотношением:

$$\lambda = \frac{\Delta m}{m} = \frac{\epsilon_0 - \epsilon}{1 + \epsilon_0}, \quad (21)$$

где ϵ_0 , ϵ - начальный и сложившийся коэффициент пористости. Изложенное позволяет записать зависимость (19) в виде:

$$\mu = \gamma_B m \left(\frac{\lambda}{\sigma_z} + \frac{\rho}{E_B} \right). \quad (22)$$

Пренебрегая правым членом зависимости ввиду его незначительности ($10^{-4} - 10^{-5}$) и принимая близость цифр $h_n \approx h_k$, получим выражение, определяющее связь водоотдачи с глубиной погружения пласта

$$\mu \approx \frac{\gamma_B \cdot m \cdot \lambda}{\sigma_z} = \frac{\gamma_B \cdot m \cdot \lambda}{\gamma_n \cdot h_n - \gamma_B \cdot h_k} = \frac{\gamma_B \cdot m \cdot \lambda}{h_n (\gamma_n - \gamma_B)} = \quad (23)$$

$$\frac{m \cdot \lambda}{h_n \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_B} - 1 \right)} = \frac{\Delta m}{h_n \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_B} - 1 \right)}.$$

Результаты расчета по данной зависимости являются предельно приближенными ввиду неопределенности величины Δm , λ и γ_{λ} , подчиняющихся также существенному изменению с глубиной, хотя они и дают порядок распределения водоотдачи в разрезе.

Следует отметить чрезвычайно низкую изученность этого вопроса, который долгое время оставался вне внимания гидрогеологов. Имеющиеся проработки связаны, в основном, с работами ученых нефтегазового направления, рассматривающих изменение пористости на больших глубинах (Магара, 1982; Привалов, 1987 г. и др.).

Варламов А.А. Граусману и М.Т. Чистякову, изменение пористости коллекторов с глубиной подчиняется следующей зависимости:

$$\alpha_1 = \alpha_0 - \frac{H(\gamma_t - \rho_{пл})}{2 \cdot 10^2 \text{ м Па}}, \quad (24)$$

где α_0 — значение открытой пористости на начало уплотнения;

$\rho_{пл}$ — для палеоглубины H ; γ_t — усредненный удельный вес твердой фазы; $\rho_{пл}$ — пластовое давление.

Уплотнение глинистых пород, выраженное через изменение активной пористости α с глубиной погружения, описывается зависимостью (Магара, 1982; Шестаков, 1991)

$$\alpha = \alpha_0 e^{-cH} \quad (25)$$

где c — константа; H — глубина погружения, м; α_0 — пористость на глубине 400 м, с которой начинает действовать закон "нормального уплотнения".

Однако эти зависимости не представляют интерес для верхней части разреза, в пределах которого развит МПВ, так как отражают закономерности изменения пористости на глубине более 500–1000 м.

В последнее время появились интересные публикации, рассматривающие изменение пористости, упругоэластичности и водоотдачи в зависимости от глубины залегания пласта для верхней части разреза.

В.М. Шестаков (1991) на основе уравнения К.Тэрцаги, отражаю-

щего связь пористости с эффективным напряжением пласта, и выражения упругоэластичности породы (без учета сжимаемости воды) установил зависимость параметра упругости от глубины залегания через коэффициент сжимаемости пласта, вводя безразмерный параметр A , численно близкий к сложившемуся на данной глубине коэффициенту водоотдачи M . Условность принятия в расчет характеристик e , γ_n , допущение равенства γ_v и γ_n также приводят к существенной неопределенности полученных результатов. Интерес представляют данные о параметрах этих зависимостей, полученные в результате обобщения лабораторных и натурных материалов.

В частности, для глинистых пород, используя зависимость Хедберга (Чепман, 1983) в виде $n = 0,656^{-0,105}$, (26) получена для диапазона глубин $z_n = 50-200$ м величина $A = 0,07-0,09$, которая, по-видимому, требует корректировки ввиду неправомерности принятия в расчет $\gamma_n = 1,0$ т/м² при природных характеристиках $\gamma_n = 2-2,5$ т/м².

Для нецементированных песков Х.Д.Войтом и Х.Ф.Бамбергом (1981 г.) на основе лабораторных опытов получена зависимость, позволяющая оценить изменение пористости с колебанием эффективного напряжения от 1,03 до 24,1 мПа

$$\Delta n = n_1 - n_2 = 0,12 n_1. \quad (27)$$

При этом значения A составили 0,013-0,019. Ниже приведены результаты определения η , A и M по ряду опытных откачек (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Отложения, их местоположение	z_n , м или интервал	η^*	$A = \eta^* \cdot z_n$	M^*
I	2	3	4	5
Аллювиальные песчано- гравийные, р.Яхсу, Таджикистан	20	10^{-4}	$2 \cdot 10^{-3}$	-
	80	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	-
	100	10^{-5}	$1 \cdot 10^{-3}$	-
	70-90	$(1-2) \cdot 10^{-5}$	$(1-2) \cdot 10^{-3}$	-
Аллювиальные песчаные, р.Болга	25-55	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$

1	2	3	4	5
глинистые, глина	10-26	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
глинистые песчаные, глина	20-40	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$
песчано-гравийные	15-40	$4 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	10^{-3}
гравийные	30-55	$8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, сделан вывод о наличии закономерного изменения упругоэластичности пород в зависимости от глубины залегания, выражаемого зависимостью:

$$\lambda^* = \frac{A}{z_n} \quad (28)$$

где A оценивается для глинистых пород $\approx 0,1$; песчаных $\approx 10^{-3}$ (по лабораторным опытам), $\approx 10^{-3}$ (по данным опытных от-
вечий).

Влияние давления перекрывающих пород на удельную емкость (напои) и гидравлическую проводимость артезианских водона-
сыщенных горизонтов рассмотрено в работе N. Serylveda и A.
Kam (1991). На основе лабораторных опытов водонасыщен-
ного образца грунта, подвергнувшегося постоянно увеличивающей-
ся нагрузке, подтверждена зависимость Тейлора между коэффи-
циентами фильтрации K и пористости (пористости) n . Последний
уменьшается с увеличением нагрузки на пласт по линейному зако-
ну (Терцаги, Рек, 1967 г.) и характеризуется постоянным ин-
дексом компрессии C_c

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \lg b} \quad (29)$$

Используя эти зависимости, получено численное решение диффе-
ренциального уравнения Гибсона, описывающего пространственные
и временные изменения коэффициентов пористости и фильтрации.

По результатам опытов и решений сделаны выводы:

в неглубоко залегающих напорных пластах, где отношение
глубины залегания горизонтов h_n к его мощности меньше 10,
сжимаемость скелета отложений α_n больше сжимаемости воды
 α_w , а для глубокозалегающих $\frac{h_n}{m} \gg 10$ сжимаемость скеле-

та имеет тот же порядок, что и сжимаемость воды $\alpha_n \approx \alpha_v$;

для высокосжимаемых водоносных горизонтов (неглубокозалегающих) кривые зависимости понижений во времени при откачке отличаются от теоретической кривой Тейса, а для глубокозалегающих (более 500 м) — (полностью ей соответствуют;

фактические кривые прослеживания $S(t)$ для откачек, опробующих пласты в интервале их залегания от 0 до 500 м, располагаются между двумя крайними положениями кривых Тейса, отражающих ход снижения уровня при залегании пласта соответственно вблизи поверхности земли и на глубине более 500 м.

Для определения сложившегося коэффициента водоотдачи на конкретной глубине погружения пласта рекомендован способ (Нагавич, 1995), основанный на использовании величины напора над кровлей водоносного горизонта, который является косвенным признаком состояния напряженности пласта под действием геостатической нагрузки. Он может быть рассмотрен на следующем примере, в котором безнапорный водоносный горизонт, погружаясь на глубину, приобретает напорность, которая проявляется в виде избыточного напора над кровлей водоносного горизонта (рис. 3). Правоммерно утверждать, что единичный объем емкостных запасов в безнапорной зоне, равный $m_0 \cdot M_0$, тождествен единичному объему упругих запасов $(h_k + m_z) \cdot M_z$

$$m_0 \cdot M_0 = (h_k + m_z) \cdot M_z. \quad (30)$$

Отсюда можно определить M_z

$$M_z = \frac{m_0 \cdot M_0}{h_k + m_z} = M_0 \cdot \frac{m_0}{h_k + m_z} = M_0 \cdot \frac{h_k + m_z}{m_0} \approx M_0 \left(\frac{h_k}{m_0} + 1 \right). \quad (31)$$

При $h_k = 0$ и равенстве $m_0 \geq m_z$ приходим к выводу, что $M_z \leq M_0$, т.е. пласт в этом случае будет близок к безнапорному, и отличие будет вызвано изменением структуры породы под давлением вышележащих пород. Несмотря на внешнюю простоту, зависимость достаточно убедительно характеризует возможное изменение M с глубиной. Достоверность распределения коэффициента M в пределах горизонта по мере его углубления зависит от исходной величины водоотдачи в безнапорной зоне горизонта и принятия

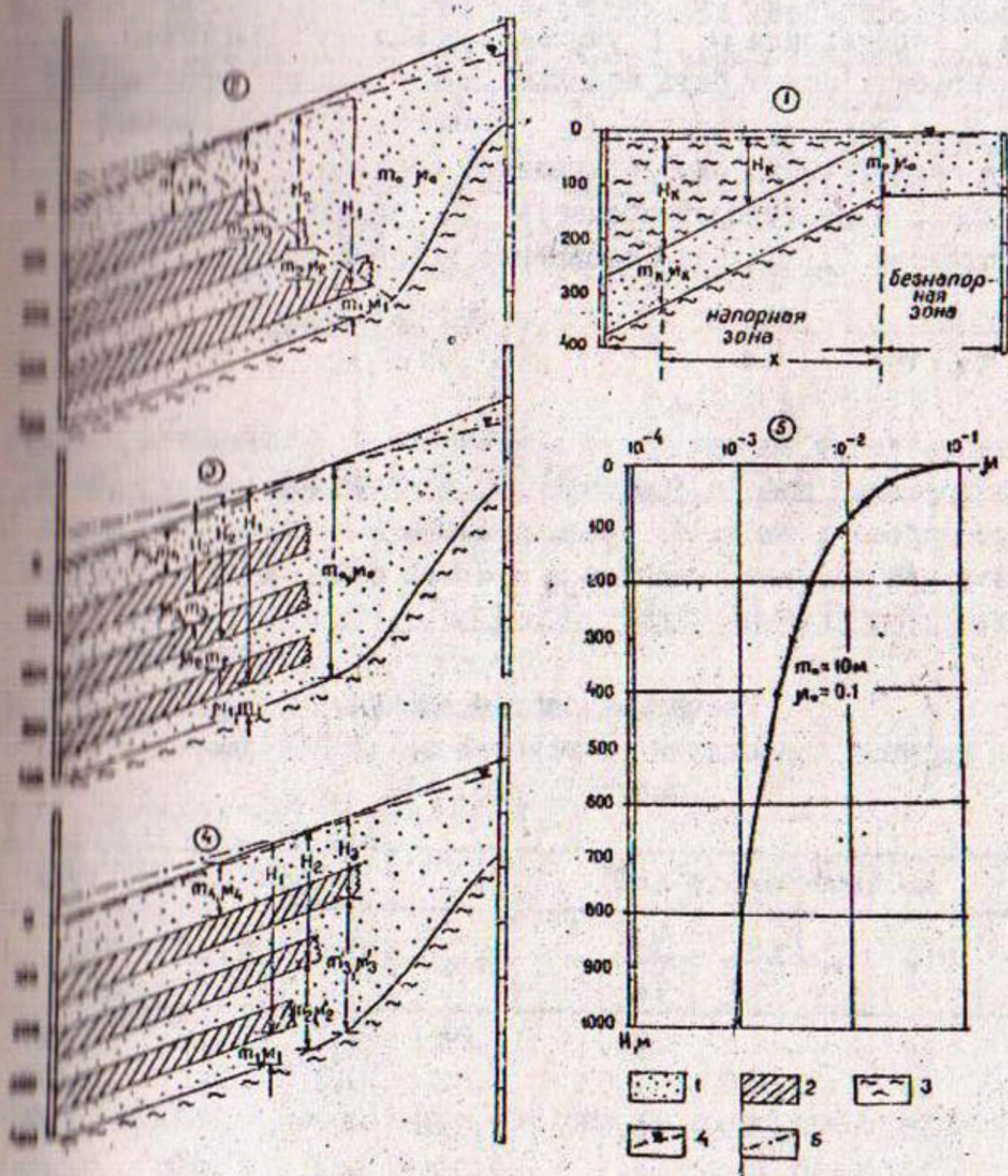


Рис. 3. Условные схемы к предварительному расчету коэффициента водоотдачи (1-4) и график его изменения с глубиной (5): 1 - водоносный горизонт; 2 - слабопроницаемые слои; 3 - непроницаемые водоупорные слои; положение уровня вод: 4 - грунтовых, 5 - напорных.

условия ее выдержанности перед погружением на всем протяжении пласта в пределах рассмотрения. В этих допущениях возможна ошибка в определении μ с учетом глубины ее залегания.

Зависимость может быть использована и для предварительной оценки μ , взяв за основу μ_0 безнапорного водоносного горизонта аналогичного литологического состава.

По своей структуре зависимость 3I близка к зависимости В.М.Шестакова (1991), сопоставление которых дает:

$$\frac{m_0}{h_k + m_0} \approx \frac{m_z}{z_n} \quad \text{при} \quad \frac{h_k + m_0}{z_n} \leq 1,1-1,2, \quad (32)$$

$$A \approx \mu_0.$$

Распределение коэффициента водостдачи в зависимости от глубины погружения пласта, рассчитанного по зависимостям 23 и 3I, приведено в табл. 4. Графики возможного изменения μ с глубиной для исходных величин $\mu = 0,1$ и $m_0 = 10$ м отражены на рис. 5.

Т а б л и ц а 4

Расчетное распределение
упругой водоотдачи по глубине залегания пласта
(схема I, рис. 3)

По зависимости (23)					По зависимости (3I)		
z_n м	m_0	$\lambda = \frac{\Delta m}{m_0}$	$\frac{\gamma_n}{\gamma_0} - 1$	μ_z	μ_0	$h_k + m_z$	μ_z
25	10	0,1	1,0	0,04	0,1	35	0,028
50	10	0,105	1,05	0,02	0,1	60	0,016
75	10	0,107	1,07	0,013	0,1	75	0,012
100	10	0,11	1,1	0,01	0,1	110	0,009
200	10	0,12	1,2	0,005	0,1	210	0,0047
300	10	0,13	1,3	0,003	0,1	310	0,0032
400	10	0,14	1,4	0,0025	0,1	410	0,0024
500	10	0,15	1,5	0,002	0,1	510	0,0019
1000	10	0,17	1,7	0,001	0,1	1010	0,0014

Такой же подход может быть применен при замещении хорошо-проницаемых отложений разделяющими слоями слабопроницаемых от-

ложений, что характерно для условий конусов выноса. Характер взаимодействия единой толщи галечников головной части конуса выноса с переслаивающейся пачкой (толщей) хорошопроницаемых и слабопроницаемых слоев в периферийной его части, или положение границы раздела, может быть приведен к трем основным схемам (рис. 3). Применительно к этим схемам для четырехпластового горизонта с тремя разделяющими слоями можно выполнить предварительный расчет распределения μ .

Граница раздела наклонена в сторону периферии (схема 2):

$$\begin{aligned}\mu_1 &= \frac{m_0 \cdot \mu_0 - (H_1 - m'_p) \mu_0}{H_1 + m_1}, \\ \mu_2 &= \frac{m_0 \cdot \mu_0 - (H_1 + m_1) \mu_1 - (H_2 - m''_p) \mu_0}{H_2 + m_2}, \\ \mu_3 &= \frac{m_0 \cdot \mu_0 - (H_1 + m_1) \mu_1 - (H_2 + m_2) \mu_2 - (H_3 - m'''_p) \mu_0}{H_3 + m_3}.\end{aligned}\quad (33)$$

Граница раздела вертикальная (схема 3):

$$\begin{aligned}\mu_1 &= \frac{m_1}{H_1 + m_1} \mu_0, \\ \mu_2 &= \frac{m_2}{H_2 + m_2} \mu_0, \\ \mu_3 &= \frac{m_3}{H_3 + m_3} \mu_0.\end{aligned}\quad (34)$$

Граница раздела наклонена в сторону головной части (схема 4):

$$\begin{aligned}\mu'_3 &= \frac{(m_0 - m_4) \mu_0}{(m_1 + m_2 + m_3 + m''_p + m'_p + H_3)}, \\ \mu'_2 &= \frac{(m_0 - m_4) \mu_0 - (H_3 + m_3) \mu'_3}{(H_2 + m_2 + m'_1 + m_1)}, \\ \mu'_1 &= \frac{(m_0 - m_4) \mu_0 - (H_3 + m_3) \mu'_3 - (H_2 + m_2) \mu'_2}{H_1 + m_1}.\end{aligned}\quad (35)$$

При последующих расчетах распределения μ в пределах каждого пласта следует в качестве исходных принимать рассчитанные значения μ и напора вблизи границы раздела (сечение I), а также величины напора в сечении II:

$$\mu_1^{\text{II}} = \frac{(H_1 + m_1)_{\text{I}}}{(H_1 + m_1)_{\text{II}}} \mu_1^{\text{I}} \quad (36)$$

В табл. 5 приведено распределение μ на границе раздела для выделенных схем и условий:

$$m_0 = 200 \text{ м}$$

$$\mu = 0,1$$

$$m_1 = m_2 = m_3 = 70 \text{ м}$$

$$m_4 = 50 \text{ м}$$

$$m_p^{\text{I}} = m_p^{\text{II}} = m_p^{\text{III}} = 20 \text{ м}$$

$$H_1 = 170 \text{ м}$$

$$H_2 = 120 \text{ м}$$

$$H_3 = 170 \text{ м}$$

Т а б л и ц а 5

Расчетное распределение
водоотдачи по глубине залегания пласта
(схемы 2-4, рис. 3)

	Глубина залегания кровли, м	μ_1	Глубина залегания кровли, м	μ_2	Глубина залегания кровли, м	μ_3	Глубина залегания кровли, м	μ_0
Схема 2	170	0,025	120	0,033	70	0,05	0	0,1
Схема 3	170	0,015	120	0,02	70	0,03	0	0,1
Схема 4	170	0,01	120	0,0315	70	0,075	0	0,1

Таким образом, достаточно убедительно объясняется проявляющаяся в процессе опробования неглубокозалегających горизонтов гетерогенность пласта по упругости. Она в отличие от принятого утверждения, на котором основана вся теория притока воды к скважинам для различных типов водоносного горизонта, и согласно которому она должна быть характерна только для безнапорного водоносного горизонта, является общим признаком для всех водоносных пластов, за исключением чисто напорных. Последние развиты на больших глубинах, являются гомогенными по степени упругости и при опробовании отражают предельную напряженность системы пласта в целом.

Гетерогенность неглубокозалегающих пластов по упругости проявляется при опробовании в начале откачки в упругих свойствах воды в пористом пространстве пласта (этап упругого режима), а затем с некоторым отставанием во времени — в истинной упругоёмкости пласта, зависящей от его пространственно-временного положения (глубина залегания и возраст отложений) и отличающейся от предельно возможной упругоёмкости собственно напорных пластов.

Следовательно, степень гетерогенности пласта по упругости является основным фактором, определяющим ход снижения уровня при опробовании всех пластов, что необходимо учитывать при их типизации применительно к геофильтрационным расчетам параметров по результатам опытных откачек.

Типизация водоносных горизонтов по характеру упругости пласта

При обработке опытных откачек с целью оценки геофильтрационных параметров опробуемых пластов ошибки расчетов, определяющие многократное отступление рассчитанных параметров от истинных, вызваны неудачным выбором расчетной схемы и соответственно методик расчета. Причиной является отсутствие четких критериев, определяющих тип водоносного горизонта. Например, ограничение водоносного пласта в кровле и подошве породами, являющимися, на первый взгляд, водоупорами, еще не основание для отнесения его к напорному пласту.

Типизация водоносных горизонтов, на которых основаны расчеты параметров по результатам ОФР, изложены в работах Мироненко, Шестакова (1978), Kruseman, Ridder (1970).

Согласно Kruseman и Ridder (1970), положивших в основу своей типизации соотношение коэффициентов фильтрации пород опробуемого пласта K , кровли K_K , подошвы K_P , выделяются следующие типы пластов: 1) напорный ($K_K = K_P = 0$); 2) полунапорный ($K_K, K_P \ll K$); 3) полубезнапорный ($K_K, K_P < K$); 4) безнапорный.

Типизацию пластов В.А.Мироненко, В.М.Шестаков (1978) до-

полнили характером однородности или неоднородности фильтрационных свойств водоносных горизонтов, выделив: 1) изолированный однородный напорный пласт; 2) гетерогенные напорные системы; а) однородный напорный пласт с перетеканием из смежного водоносного горизонта через относительно водоупорный разделяющий слой, в котором упругие запасы слоя пренебрежимо малы; упругие запасы слоя значительны и требуют учета; б) изолированный гетерогенный пласт, в котором напорный пласт сложен слоями однородных по проницаемости и емкости фильтрующих пород; однородный пласт гетерогенных пород (породы с двойной пористостью); 3) безнапорный изолированный, снизу пласт: а) двухслойный; б) одрослойный.

Последняя типизация характеризует широкий спектр развитых в природе типов и подтипов водоносных горизонтов, особенности проявления которых при ОФР отражены как в фундаментальных, так и частных решениях Ч.Тейса, Джейкоба, М.Хантуша, А.Боултона, В.М.Шестакова (1978), являющихся методической и теоретической основой оценки геофильтрационных параметров.

Однако правильный выбор типа водоносного горизонта на практике представляет определенные трудности, так как показатели пласта могут быть получены только на конечном этапе расчета, когда началась обработка ОФР с гипотетического представления о типе водоносного горизонта методом последовательных приближений, используя различные методы и схемы, приходим к окончательному выводу. Такой принцип подхода к интерпретации ОФР, который представляется достаточно надежным, изложен как в рекомендациях по обработке откачек (Мироненко, Шестаков, 1978), так и в структуре программ расчета параметров на ЭВМ (Дульките, 1982).

Сокращение объема расчетов возможно при максимальном приближении расчетной схемы к природной уже на первом этапе расчетов - стадии схематизации. Приведем дополнительные критерии, способствующие установлению реального типа водоносного горизонта и характеризующиеся рядом косвенных признаков, в основе которых отражены условия формирования и жизнедеятельности опробуемого пласта в геологический период времени его существования.

К числу таких признаков следует отнести (Нагевич, Сергеева, 1993):

возраст и глубину залегания пород водоносного горизонта, его кровли и подошвы, косвенно характеризующие степень их консолидации, вызванной воздействием возрастающего геостатического (литостатического) давления при погружении на глубину;

величину напора над кровлей пласта;

гипсометрическое положение и удаленность областей питания опробуемого и смежных водоносных горизонтов;

соотношение напоров водоносного горизонта с напорами смежных водоносных пластов, расширяющее возможности оценки процессов взаимодействия горизонтов через кровлю и подошву (разделяющие их слои);

различие качественного состава опробуемого и смежных пластов.

Первая попытка такой типизации (табл. 6), безусловно, может вызвать возражения в наименовании выделенных типов пластов. Автор не претендует на их окончательное определение. В дальнейшем их название может уточняться. Однако смысл, вложенный в основу типизации, о гетерогенности пластов по упругости является объективной реальностью и подтверждается не только вышеприведенными доказательствами, но и опытом массового опробования водоносных горизонтов, залегающих на различных глубинах от поверхности земли и отличающихся рядом косвенных признаков. Условная схема распределения типов водоносных горизонтов в зависимости от глубины его залегания и возраста водовмещающих пород приводится на рис. 4. Она отражает изменение водоотдачи пластов по вертикали и в зависимости от положения пласта относительно поверхности земли и времени его формирования. Аналогичная картина изменения водоотдачи должна прослеживаться в пределах одного водоносного горизонта, погружающегося постепенно на большие глубины, например, в отложениях мела.

Приведенная типизация водоносных горизонтов с учетом этих факторов позволяет сформулировать следующие, не требующие особых доказательств, аксиомы:

в пределах одного ритмостратиграфического комплекса отложе-

Типизация водоносных пластов применительно к интерпретации ОФР

№ п/п	Тип водоносно- го горизонта	Подтип	Характер пласта по упругости	Основные показатели пласта		Косвенные признаки пласта
				упруго- емкость	водоотдача	
I	2	3	4	5	6	7
1.	Напорный пласт собственно напорный	Гомогенный		$\cdot 10^{-5} - 10^{-6}$	$\cdot 10^{-3} - 10^{-4}$	Большие глубины залегания пласта ($H_T > 500$ м) Напор (H_B) равен или больше глубины залегания (H_T) Большая удаленность от области питания ($L - 30-50$ км и более) Дочетвертичные отложения (от N до P_z)
		Потенциально напорный	Гетерогенный	$\cdot 10^{-4} - 10^{-5}$	$\cdot 10^{-2} - 10^{-3}$	$H_T < 500$ м $H_B \leq H_T$ $L < 50$ км от N до P_z
2.	Квазинапорный пласт (подобный напорному)	Пласты с перетеканием из смежных пластов через разделяющий слой	Гетерогенный	$\cdot 10^{-4} - 10^{-5}$	$\cdot 10^{-2} - 10^{-3}$	$H < 500$ м $H_B \leq H_T$ Напоры отдельных слоев отличаются, но близки по абсолютному значению $L < 20$ км Дочетвертичные и четвертичные отложения (от Q до P_z)

1	2	3	4	5	6	7
3. Безнапорный пласт	Потенциально-безнапорный (двухслойный)	Гетерогенный	Ю-3 Ю-4	Ю-1 Ю-2	Первый от поверхности земли водоносный горизонт	
	Собственно безнапорный				Напор (при горизонте водоупоре) равен мощности водоносного горизонта	
					Область питания близка или совпадает с площадью развития горизонта	
					Преимущественно четвертичные отложения	

ний не могут быть два, диаметрально противоположных, типа водоносных горизонтов – собственно напорный и безнапорный, а должен наблюдаться постепенный переход от собственно безнапорных через квазинапорные в собственно напорные. Такая последовательность перехода должна прослеживаться как в горизонтальном (в направлении движения подземных вод), так и вертикальном (по глубине) направлениях;

в пределах четвертичного флювиального ритмостратиграфического комплекса возможность проявления собственно напорных пластов сведена к нулю, и здесь могут быть только собственно безнапорные и квазинапорные пласты;

проявление диаметрально противоположных типов пласта (собственно напорных и безнапорных) возможно лишь при наличии в разрезе двух разновозрастных ритмостратиграфических комплексов, и чем древнее возраст отложений нижележащего комплекса, тем больше вероятность проявления приуроченных к ним водоносных горизонтов как напорных.

Роль динамичности подземных вод в пласте и ее отражение в расчетных зависимостях

Естественный поток подземных вод учтен в решении М.Хантуша (1962 г.) применительно только к безнапорному водоносному горизонту. Оно имеет вид уравнения Хантуша–Джейкоба для горизонта с перетеканием, в который входит функция Хантуша, учитывающая этот процесс:

$$S - S^2/2m = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\beta} \cos \theta\right) W(u_r, \frac{r}{\beta}), \quad (37)$$

где $m = h_e$ – мощность безнапорного водоносного горизонта;

$\beta = \frac{2m}{i}$; i – уклон водоупорного основания; θ – угол, характеризующий положение точки наблюдения (пьезометра) относительно направления потока; $W(u_r, \frac{r}{\beta})$ – функция Хантуша для горизонта с перетеканием.

Аргумент этой функции β является аналогом параметра перете-

кания B . Согласно этому решению, стабилизация уровня в пределах области влияния откачки должна наблюдаться при достижении времени:

$$t \geq 2,3 \frac{\beta^2}{a_r} \text{ и условия } \tau/\beta \geq 0,3. \quad (38)$$

При стационарном режиме зависимость (37) принимает вид:

$$S - S^2/2m = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(-\frac{\tau}{\beta} \cos \theta\right) K_0\left(\frac{\tau}{\beta}\right), \quad (39)$$

где $K_0\left(\frac{\tau}{\beta}\right)$ - функция Бесселя второго рода нулевого порядка.

Анализ зависимости показывает несущественность влияния экспоненциальной функции (рис. 5) на понижение уровня при любом расположении наблюдательных скважин (разброс крайних значений для реальных уклонов потока не превышает 23%). Особенно слабо оно проявляется при значениях $i \leq 0,01$, когда $\frac{\tau}{\beta}$ - минимальная ($\tau < 0,1$), величина экспоненциала близка к единице, а функция Хантуша-Джейкоба - к функции Тейса, проявляясь существенным отступлением от нее лишь при значительной продолжительности откачек (десятки суток). Следует отметить, что уравнение Хантуша для условий перетекания отражает процесс формирования расхода откачки за счет перетекания через разделяющий слой (сверху, снизу или совместно) на всем расстоянии пласта r пределах радиуса влияния (питания) откачки R_n , равному $0,89B$. Это предусматривает, что расход потока по самому пласту на расстоянии R_n от скважины равен нулю, а на фильтре скважины - дебиту скважины.

Иная картина наблюдается при откачке из пласта, к которому приурочен поток подземных вод. В этом случае расход скважины на каком-то расстоянии полностью компенсируется расходом естественного потока подземных вод и далее этого расстояния изменения напора не наблюдается, т.е. действует граница I рода ($H = \text{const}$), обеспечивающая поступление подземных вод к скважине по пласту за счет потока. В этом случае более правомочным является учет потока через границу постоянного напора, положение которой требует выяснения.

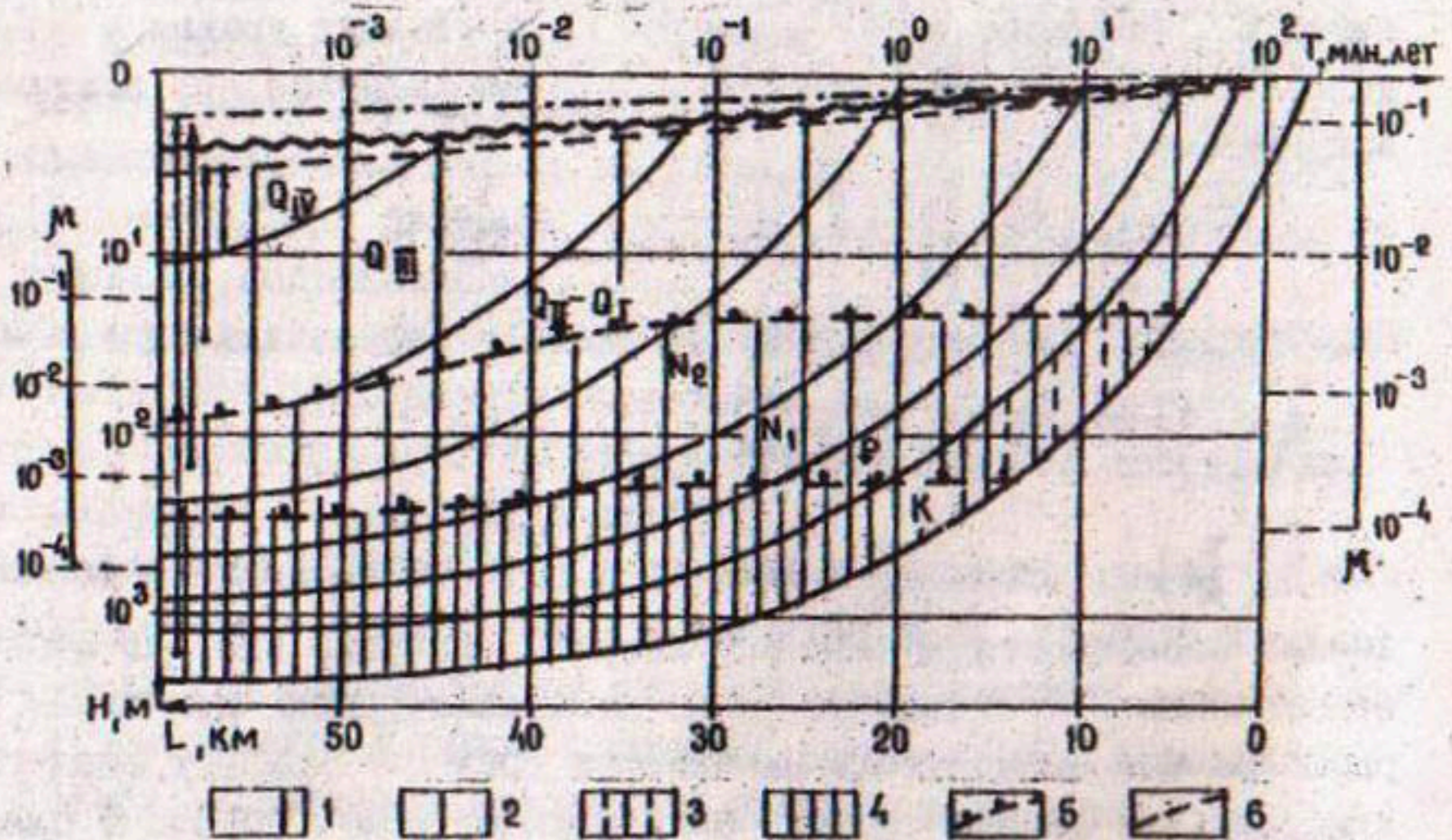


Рис.4. Условная схема распределения типов водоносных горизонтов в зависимости от глубины их залегания и возрасте водовмещающих пород. Зоны развития водоносных горизонтов: 1 – безнапорных, 2 – квазинапорных, 3 – потенциально напорных, 4 – напорных; 5 – контуры зон развития водоносных горизонтов; 6 – возрастные границы отложений.

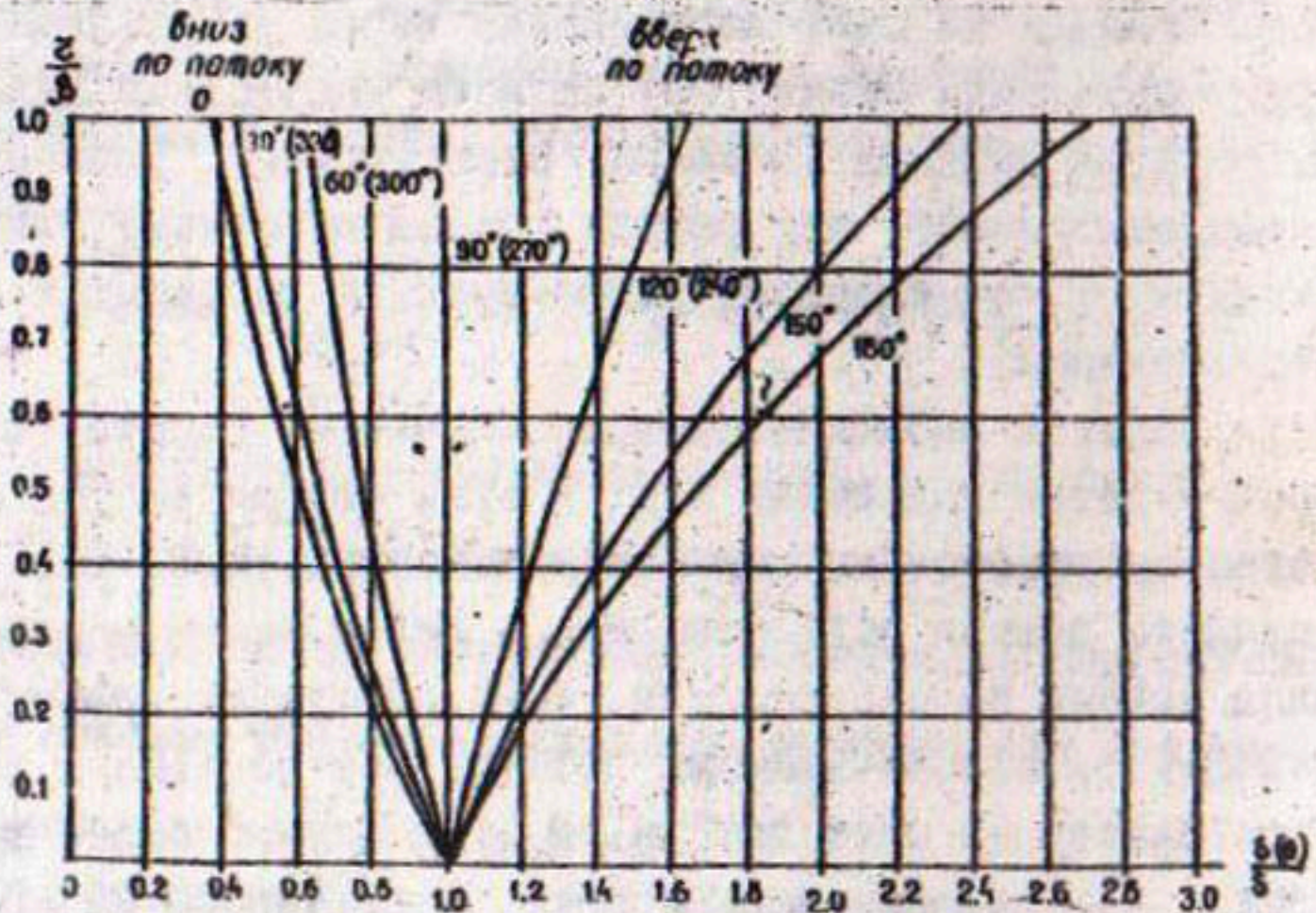


Рис.5. Соотношение понижений $S(\theta)$ в пьезометрах, занимающих различное положение относительно направления потока к понижениям S в пьезометрах на створе, расположенном нормально к нему, в зависимости от величины z/β .

Наличие потока характерно не только для безнапорных пластов, но и для пластов всех типов, включая и собственно напорные, что и является причиной стабилизации понижений при эксплуатации подземных вод таких горизонтов. Параметр β для всех горизонтов отражает положение источника питания относительно опробуемой скважины, и название его должно характеризовать особенности процесса, возникающего при работе скважины в потоке. При откачке создается стабильная во времени воронка депрессии (область понижений), в пределах которой выделяется область питания откачки. Ее параметры определяются по общеизвестным решениям (Бэр, Заславский, 1979; Де Уист, 1969), согласно которым нейтральная линия тока, огибающая область питания, может быть построена по фиксированным координатам ее точек y_0, y_∞, x_0 (рис. 6), равным:

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{Qc}{2\pi km_l}; \quad \frac{y_0}{x_0} = 1,57; \quad y_0 = 1,57x_0; \\ y_0 &= \frac{Qc}{4 km_l}; \end{aligned} \quad (40)$$

$$y_\infty = \frac{Qc}{2 km_l}; \quad \frac{y_\infty}{x_0} = 3,14; \quad y_\infty = 3,14x_0.$$

В этих решениях неопределенность в построении воронки вызвана незнанием удаленности от скважины вверх по потоку зоны плоского потока, в пределах которой дебит откачки полностью компенсируется шириной фронта потока $2y_\infty$, т.е. необходимо установить величину x_∞ . Она может быть определена при принятии следующих условий, не вызывающих возражений:

область питания имеет форму полуэллипса, в фокусе которого на большой оси размещается скважина, а ширина полосы питания $2y_\infty$ проходит через малую ось его координат;

координаты любой точки эллипса (полуэллипса) определяются зависимостью (рис. 6).

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (41)$$

где a — большая ось эллипса; b — малая ось эллипса; c — половина фокусного расстояния.

Выразив эти характеристики через показатели нейтральной линии для точки В в сечении, проходящем через скважину, имеем

$$\begin{aligned}x &= -(a - x_0), \\y &= y_0 = 1,57x_0, \\z &= 2y_0 = 3,14x_0,\end{aligned}$$

$$\frac{(a - x_0)^2}{a^2} + \frac{(1,57x_0)^2}{(3,14x_0)^2} = 1,$$

$$(a - x_0)^2 = 0,75a^2,$$

$$0,25a^2 - 2x_0a + x_0^2 = 0. \quad (42)$$

Решение квадратного уравнения относительно a приводит к

$$a = -7,46x_0.$$

$$\text{Отсюда } C = x_\infty = -(a - x_0) = -6,46x_0. \quad (43)$$

Такая картина области питания откачки может быть создана при условии постоянного напора в сечении потока, проходящего через начало координат. Здесь, в зоне, примерно на расстоянии, равном $-2x_0$, прослеживается зона плоского потока, а по оси

y — равенство расхода естественного потока расходу скважины обеспечивает сохранения здесь постоянных напоров. Такая схема, характерная для скважин, расположенных у реки, предусматривает учет ее влияния введением в расчет нагнетательной скважины, расположенной на таком же расстоянии и работающей с аналогичным расходом.

В данном случае влияние потока может быть учтено аналогично расположив нагнетательную скважину в фокусе положительного (по оси x) эллипса. Тогда радиус влияния откачки $R = 2c =$

$$= 12,92x_0 = \beta, \quad (44)$$

где β — параметр, характеризующий удаленность контура питания может быть определен как

$$\beta = 12,92 \frac{Q}{2\pi k m l} = 2,057 \frac{Q_c}{k m l}. \quad (45)$$

Из выведенного решения ясно, что параметр β зависит от расхода откачки, водопроницаемости пласта и уклона потока (табл. 7, рис. 7), что достаточно логично.

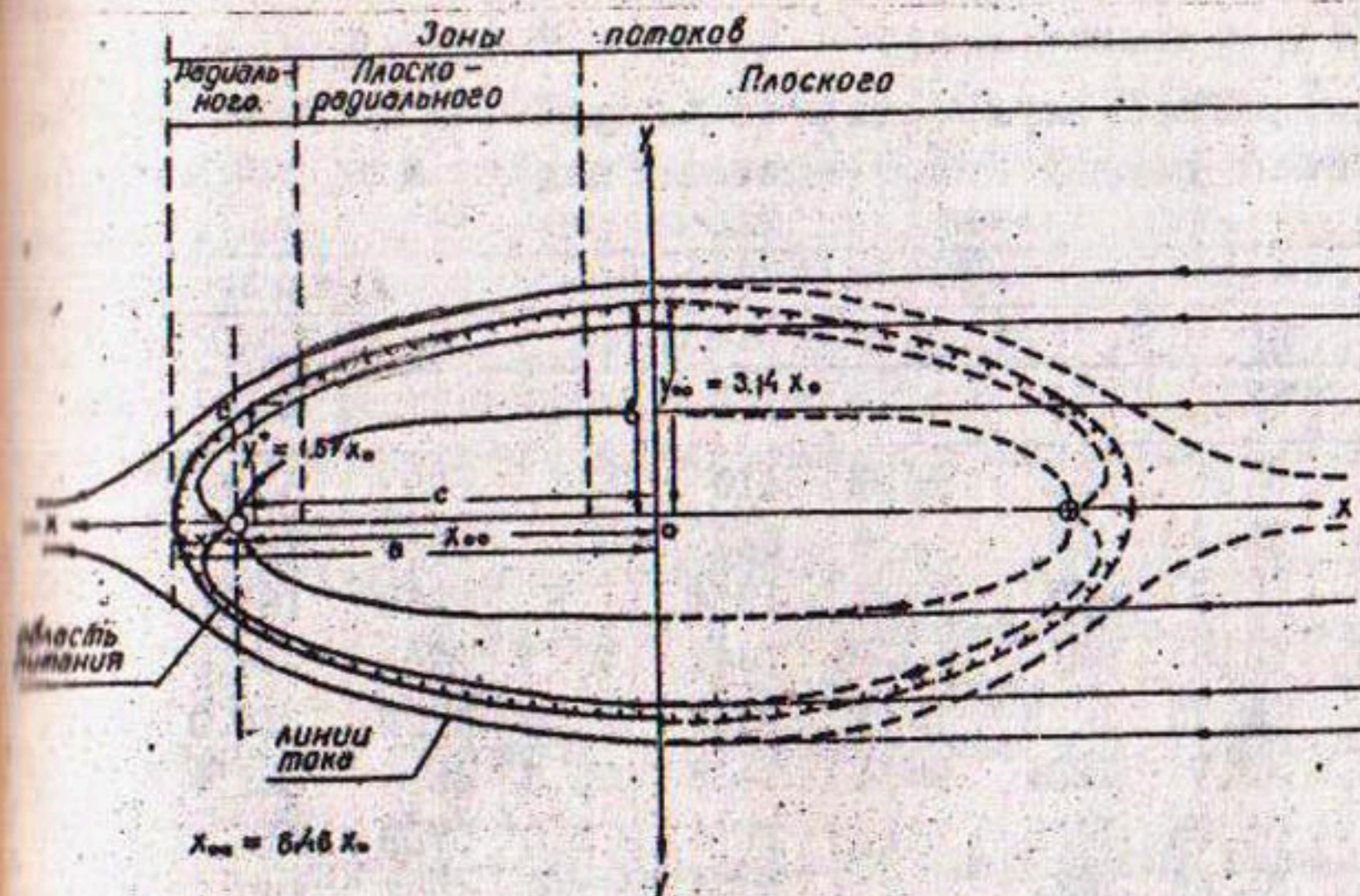


Рис.6. Схема учета планового потока подземных вод.

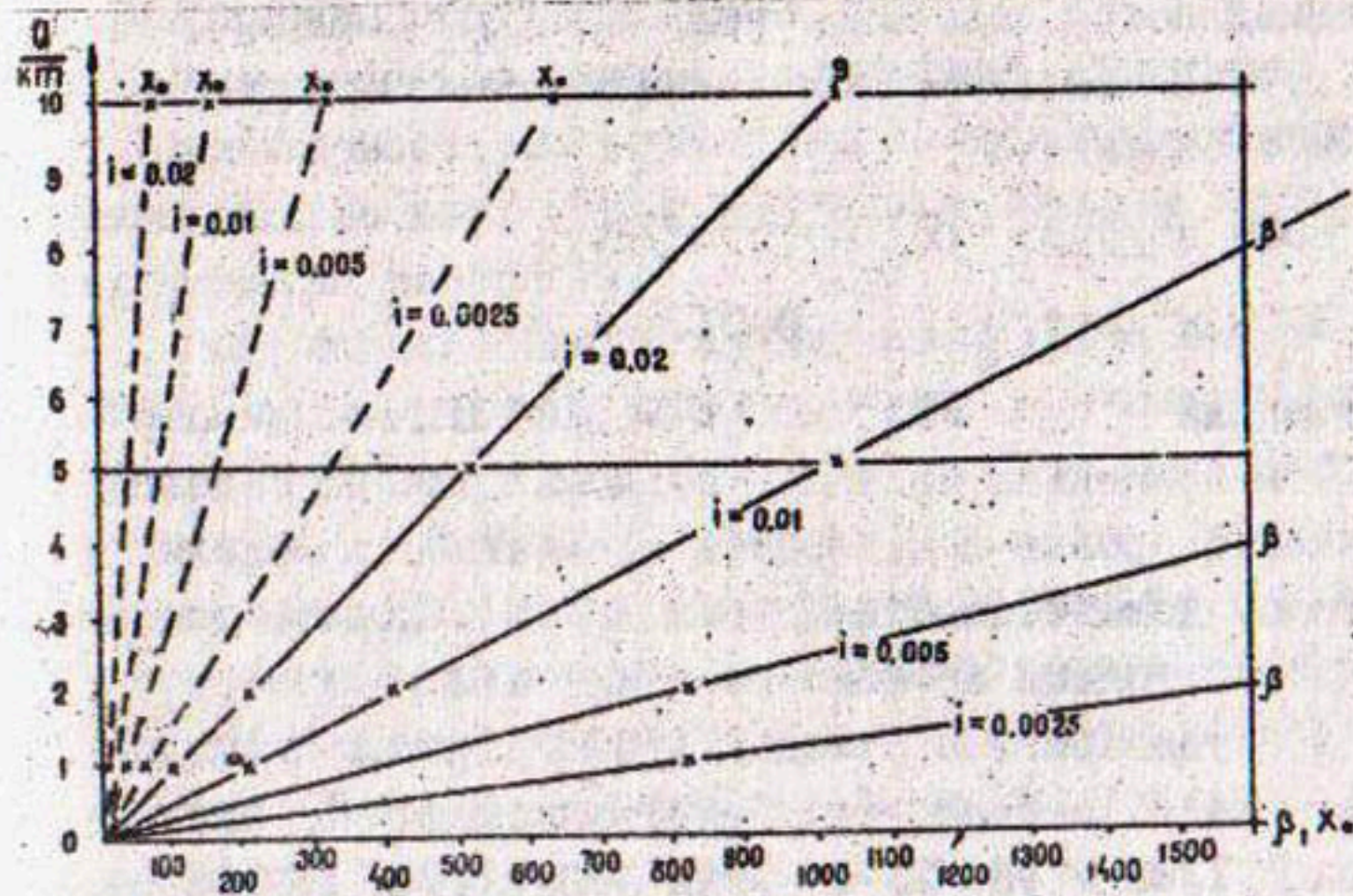


Рис.7. Графики к определению x_0 и β для скважины, работающей в потоке подземных вод.

Т а б л и ц а 7

Характеристика параметров β и x_0 при
различных уклонах потока подземных вод

$\frac{Q}{\text{кгп}}$	Уклон потока							
	0,02		0,01		0,005		0,0025	
	β	x_0	β	x_0	β	x_0	β	x_0
1.	102,7	7,95	205	15,9	410	31,8	820	63,6
2.	205,4	15,9	410	31,8	820	63,8	1640	127,6
3.	307,5	23,8	617	47,7	1234	95,8	2468	191,6
4.	410,8	31,8	821	63,65	1642	127,3	3284	254,6
5.	513,5	39,75	1027	79,5	2054	159,0	4108	318,0
6.	615	43,7	1234	95,4	2468	190,8	4936	381,6
7.	719	55,65	1438	111,3	2876	222,6	5752	445,2
8.	821	63,65	1644	127,3	3288	254,6	6576	509,2
9.	922	71,55	1848	143,1	3696	286,2	7392	572,4
10.	1027	79,5	2054	159,0	4108	318	8217	636,0

Для количественной оценки параметра β проведено моделирование скважины, работающей в напорном пласте, к которому приурочен естественный поток подземных вод (М.М.Сулейманов, Е.В.Сергеева, 1993 г.). В основу модели положены следующие характеристики пласта и скважины:

$$Q_c = 6000 \text{ м}^3/\text{сут.}, \quad \alpha = 10^5 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

$$k_{гп} = 1000 \text{ м}^3/\text{сут.}, \quad i = 0,01.$$

При этих значениях - $x_0 = 95,5 \text{ м}$; $\beta = 1234 \text{ м}$. Решены стационарная (t_∞) и временная задачи, что позволило на основе полученных понижений уровня подтвердить адекватность модели природным условиям, доказательством чего явился полное совпадение рассчитанных методами временного и площадного прослеживания параметров с заложенными в модель. По графикам площадного прослеживания радиус влияния (питания) скважины R_0 составил соответственно 1380 м (на 20-е сутки откачки) и 1400 м (при достижении установившегося режима). По модельным понижениям на те же моменты времени определялся параметр β путем

расчета функции Хантуша для потока подземных вод, нахождения по таблицам функции ее аргумента τ/β , а затем $-\beta$ (табл. 8). При оценке β по точкам, расположенным вверх и вниз по потоку, применялись поправочные коэффициенты (рис. 5). Полученные значения β составили 1250–1538 м при преобладающих величинах 1250–1350 м, т.е. численные характеристики β близки к теоретически рассчитанному ($\beta = 1234$ м). Расхождения, составляющие не более 8–9%, можно отнести к допустимым погрешностям аналогового моделирования.

Результаты моделирования подтвердили правильность теоретической оценки величины β в напорных пластах и раскрыли физическую сущность этого параметра, характеризующего удаленность положения источника питания подземных вод, формирующего расход откачки.

Доказательством приемлемости такой оценки параметра является приведенное в табл. 9 сравнение понижений, рассчитанных по зависимости Хантуша для скважины, работающей в потоке подземных вод ($\beta = 12,92 \text{ м}$), и для скважины, расположенной у границы постоянного напора на расстоянии $L = \beta/2$. Расхождения в понижениях не превышают 2,6%, что находится в рамках требований и точности расчетов.

Таким образом доказаны следующие положения:

динамичность подземных вод в виде естественного потока проявляется во всех типах водоносных пластов от безнапорного до собственно напорного;

учет естественного потока может быть выполнен на основе использования решения для скважины, работающей вблизи границы с постоянным напором и удаленной от нее вниз по потоку на расстояние $L = \beta/2$;

параметр β , характеризующий положение (удаленность) источника питания подземных вод, формирующего расход откачки, может быть назван параметром интенсивности питания (в данном случае – за счет потока подземных вод) и зависит от гидравлических характеристик среды и потока K, m, i, Q_0 , отраженных в решении (45).

Т а б л и ц а 8

Расчет параметра β по результатам моделирования напорного пласта

$r, \text{ м}$	Напр. створа	$S, \text{ м}$		$w(u, \beta) = \frac{4\pi kms}{Q}$		τ/β		β		Поправка на полож. створа		β с поправкой		R		$R, \text{ м}$ рас-чет	
		$t/20$	t/∞	$t/20$	t/∞	$t/20$	t/∞	$t/20$	t/∞	$t/20$	t/∞	$t/20$	t/∞	$t/20$	t/∞	$t/20$	t/∞
25,0	Вверх	3,92	4,08	8,2	8,55	0,018	0,016	1388	1562	1,04	1,04	1356	1501				
	Поперек	3,83	4,06	8,136	8,51	0,019	0,017	1315	1470	1,0	1,0	1315	1470				
	Вниз	3,84	4,06	8,051	8,051	0,02	0,017	1250	1470	0,98	0,98	1300	1500				
50,0	Вверх	3,26	3,4	6,835	7,128	0,037	0,031	1352	1562	1,05	1,05	1286	1487		1380	1400	1234
	Поперек	3,18	3,38	6,666	7,092	0,04	0,034	1250	1470	1,0	1,0	1250	1470				
	Вниз	3,1	3,32	6,502	6,96	0,043	0,035	1162	1423	0,95	0,95	1223	1503				
100,0	Вверх	2,7	2,9	5,66	6,079	0,068	0,055	1470	1318	1,08	1,08	1361	-				
	Поперек	2,52	2,72	5,255	5,701	0,08	0,065	1250	1538	1,0	1,0	1250	1538				
	Вниз	2,38	2,64	4,99	5,53	0,092	0,07	1086	1428	0,89	0,94	1220	1519				
200,0	Вверх	2,28	2,52	4,73	5,28	0,12	0,08	1666	-	1,14	1,1	1461	-				
	Поперек	1,88	2,06	3,94	4,31	0,16	0,12	1250	1666	1,0	1,0	1250	1666				
	Вниз	1,6	1,86	3,35	3,896	0,22	0,16	909	1250	0,78	0,84	1165	1488				

Т а б л и ц а 9

Сравнение теоретических расчетов понижений

от скважины

Номер расч.	Расчет зависимости	$\frac{Q}{4\pi M m}$	$\bar{z} = z/\beta$	$\beta = \frac{\rho}{\tau}$	Понижения на время t , сут			
					2	20	100	∞
1	С учетом ест. потока	0,477	0,2	-	3,06	3,7	3,83	3,83
2	Граница пост. напора	0,477	-	49,36	3,09	3,63	3,73	3,73
	% расхождения				0,98	1,9	2,6	2,6

Примечание: 1 – скважина, работающая в потоке; 2 – у границы постоянного напора.

Обоснование расчетных зависимостей, отражающих состояние упругости пласта и динамичности подземных вод в пласте

Учет гетерогенности пласта по упругости

При обработке результатов опытных откачек с целью оценки геофильтрационных параметров используются в зависимости от типа водоносного горизонта фундаментальные решения:

для напорного пласта – Ч.Тейса;

для напорных пластов с перетеканием через разделяющие слои – М.Хантуша, Ч.Джейкоба;

для безнапорных пластов, в том числе и двухслойных, – Н.Болтона.

Однако такое резкое разграничение пластов по типам, которым соответствуют эти решения, в природе не наблюдается. Отмеченное и ранее (Мироненко, Шестаков, 1978), но более обоснованное в последнее время (Нагевич, Сергеева, 1993; Нагевич, 1995; Шестаков, 1991; Serulveda, Zask, 1991), изменение коэффициентов пористости и водоотдачи с увеличением геостатического давления определяет и зависимость геофильтрационных пара-

метров от глубин залегания и возраста водоносного горизонта, их постепенную изменчивость в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Это определяет наличие в природе четких закономерностей распределения геофильтрационных параметров водоносных горизонтов, которые в настоящее время не учитываются в практике их расчета, что приводит зачастую к неправильному выбору схем, и, как следствие, к недостаточно обоснованным конечным результатам. Наиболее ярким примером отношения к параметрам водоносных горизонтов как к постоянным величинам, независимым от вышеприведенных критериев, является, рассмотрение нижнего хорошопроницаемого слоя в типовом двухслойном пласте как напорного, характеризующегося коэффициентом пьезопроводности порядка $10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$, который затем, вследствие снятия напоров в процессе откачки, становится безнапорным. На самом деле такой слой не может быть напорным и величина гравитационной водоотдачи, определенная по результатам откачки, характеризует его емкостные свойства как в естественных условиях, так и в условиях его возбуждения, а проявляющаяся на первом этапе упругая водоотдача отражает упругие свойства воды в пористом пространстве породы.

Аналогичные допущения положены в основу ряда решений (Ehlig, Haleraaka, 1976; Moench, Prickett, 1972) для так называемых напорно-безнапорных пластов, когда принимается, что пласт при опробовании переходит из напорного в безнапорный (снижение уровня в процессе откачки ниже кровли пласта) или напорный пласт граничит с безнапорной зоной (зона в начале места погружения пласта). И в том и другом случае принимается, что напорный горизонт характеризуется коэффициентом пьезопроводности порядка $10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$, даже непосредственно на границе безнапорной зоны, а при опробовании переходит в безнапорный. На самом деле полученная по результатам интерпретации откачки величина водоотдачи в этих случаях также должна характеризовать истинную упругоёмкость пласта, далекую от предельной и близкую к гравитационной.

Можно привести ряд примеров, когда подход к типу водонос-

ного горизонта без учета вышеизложенных критериев приводит к неправильному выбору типа водоносного горизонта и вследствие этого неверным выводам. Так, П.Н.Костюкович (1979), анализируя собственно безнапорный водоносный горизонт методами для собственно напорного, приходит к выводу об изменении коэффициента пьезопроводности в зависимости от расстояния наблюдательной скважины от опробуемой.

Таким образом, подчиненность емкостных параметров глубине залегания пласта и возрасту слагающих его отложений определяет две основные особенности пласта:

емкостные параметры пласта в зависимости от глубины его залегания характеризуются величинами в той или иной степени отличающимися от упругой водоотдачи предельно напряженных собственно напорных пластов. При малой глубине погружения водоносного горизонта они приближаются к величинам гравитационной водоотдачи;

отличие истинной упругоёмкости пласта от предельно возможной, характеризующей собственно напорный пласт, вызывает при проведении откачек проявление гетерогенности пласта по упругости, когда на начальном этапе понижения отражают упругие свойства воды в пористой среде, а на конечном этапе — естественную напряженность пласта и, соответственно, его реальную водоотдачу.

Следует сказать, что отмеченная Boulton (1963) для безнапорного пласта гетерогенность его по упругости, заключающаяся в замедлении проявления гравитационной водоотдачи и отражающая прохождение под влиянием его возбуждения в пласте упругой и гравитационной волн, не является характерной только для условий откачки, под влиянием которой происходит изменение состояния напряженности пласта.

Такой же характер деформации водонасыщенных пластов от изменения напряжения отмечен Е.Ф.Саваренским (1972) при прохождении через водоносные пласты сейсмических волн, что и отражается на их годографах, которые по внешнему виду аналогичны графикам прослеживания понижения во времени, теоретически описанным Н.Боултоном и отражающим изменение напряженности пласта.

Первый этап графика характеризует скорость прохождения волны по наиболее упругой среде, каковой в системе водоносного пласта является вода и отражает ее упругие свойства в пористой среде. Конечная часть графика в пределах третьего этапа характеризует скорость прохождения волны по системе водоносного пласта в целом, в которой преобладающую роль играет упругость скелета породы или его пластичность, т.е. при прохождении через пласт проявляется сначала упругая волна (I этап), а затем, с некоторым отставанием во времени — пластическая волна (III этап). Между этими этапами наблюдается переходный II этап, в пределах которого скорость распространения упругой волны в короткий период времени стабилизируется, увеличиваясь в пределах III этапа. Этим примером хотелось только подчеркнуть, что гетерогенность проявления упругих свойств водонасыщенных пластов носит общий характер и проявляется во всех случаях воздействия на пласт, связанных с изменением напряжения, в том числе и в случае возбуждения пласта опытными откачками.

Для собственно напорных водоносных пластов, приуроченных к древним породам и опущенным на большие глубины относительно поверхности земли (более 500 м), эти две волны совпадают и отражают степень упругости пласта в целом. В том же водоносном горизонте на участках его приближения к поверхности земли скелет породы находится в менее напряженном состоянии и его упругоэластичность несколько отличается от упругоэластичности воды. В этом случае должно наблюдаться некоторое отставание пластической волны от упругой, т.е. даже в напорных водоносных горизонтах на графиках временного прослеживания возможно проявление этапов, отражающих этот процесс.

По своему характеру они аналогичны графикам, характерным для собственно безнапорных водоносных горизонтов для которых пластическая волна является гравитационной. Графики отличаются только меньшим временем запаздывания для таких пластов, названных условно потенциально напорными, и практическим отсутствием периода ложностационарного режима с переходом упругого режима в упругопластический, отражающий непосредственно упругоэластичность пласта и, соответственно, его параметры в естественном состоянии.

Такой же характер проявления естественной упругоэластичности пласта наблюдается и в квазинапорных пластах (пласты с перетеканием) с несколько большим во времени шагом запаздывания проявления упруго-пластической волны в пределах III этапа, где на ход снижения уровня оказывают влияние и процессы перетекания из смежных пластов через разделяющие слои.

Изменение водоотдачи от упругой через упруго-пластическую до гравитационной осуществляется по экспоненциальному закону, и двучленная структура водоотдачи, отражающая упругость воды μ_v (величины практически постоянной) и упругость породы μ_n (величины, изменяющейся с погружением горизонта под действием геостатического давления), характерна для всех типов водоносных горизонтов, а не является, как это было отмечено Boulton (1963), уделом только безнапорного пласта:

$$\mu_{пл} = \mu_v + \mu_n [1 - \exp(-\lambda \Delta t_n)], \quad (46)$$

где λ - величина, обратная индексу задержки проявления упруго-пластической или гравитационной водоотдачи; Δt_n - время запаздывания.

Зависимость (46) имеет универсальный характер для всех типов водоносных горизонтов. Она предусматривает при совпадении упругой и упругопластической волн, проявляющемуся в собственно напорных, гомогенных по упругости, пластах, в которых время запаздывания близко к нулю, характеристику водоотдачи пласта, отражающей его упругое состояние в целом. Характер снижения уровня в таких пластах отвечает зависимости Ч.Тейса для условий бассейна.

Для гетерогенных по упругости изолированных пластов (потенциально напорных) в процессе откачки характерно изменение величины водоотдачи от упругой до упругопластической и в зависимости от состояния упругоэластичности пласта, характеризующейся соотношением составляющих водоотдачи пласта ($\gamma = \frac{\mu_n}{\mu_v}$), время задержки проявления упругопластической волны различное. В общем виде понижение уровня в таких пластах может быть записано в виде уравнения Boulton (1963):

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W(u_y, u_{yn}, \bar{t}_{yn}), \quad (47)$$

в котором u_y, u_{yn} – безразмерные аргументы функции; $u_y = \frac{\tau^2}{4\alpha^{**}t}$, где α^{**} – коэффициент пьезопроводности; $\alpha^{**} = \frac{km}{\mu^{**}}$; μ^{**} – коэффициент упругой водоотдачи, обусловленный, в основном, упругостью воды в пористом пространстве пласта; $u_{yn} = \frac{\tau^2}{4\alpha^*t}$, где α^* – коэффициент пьезопроводности пласта, $\alpha^* = \frac{km}{\mu^*}$; μ^* – коэффициент упругопластической (сложившейся) водоотдачи, обусловленный упругостью пласта в целом; $W(u_y, u_{yn}, \bar{t})$ – функция скважины, аналогичная в начальный период функции перетекания $W(u_y, \bar{t})$, переходящая затем в функцию Боултона $W(u_{yn}, \bar{t})$ для условий упругопластической среды; $\bar{t} = \frac{\tau}{b_d}$, где b_d – параметр дренирования, характеризующий замедление проявления упругопластической водоотдачи, связанный с индексом Боултона для запаздывания I/λ зависимостью:

$$b_d = \sqrt{\frac{\alpha^*}{\lambda}}.$$

Уравнение определяет на графиках снижения уровня проявление характерных для безнапорного пласта трех этапов снижения уровня. В пределах III этапа процесс снижения уровня отражает сложившуюся упругопластическую водоотдачу опробуемого пласта и подчиняется зависимости Тейса (10).

Реальная водоотдача потенциально напорного пласта в соответствии с его положением относительно поверхности земли (глубиной залегания) должна изменяться от близкой к упругой (на глубине более 500 м) до близкой к гравитационной (на выходе пласта на поверхность земли). Типовые кривые прослеживания в виде эталонных кривых функции (47), которые отражают увеличение времени запаздывания сложившейся водоотдачи пласта с уменьшением глубины его залегания, приведены на рис. 8. Типовые кривые характеризуют соотношение реальной и упругой водоотдач $\gamma = 1, 2, 5, 10, 20, 100, 200$.

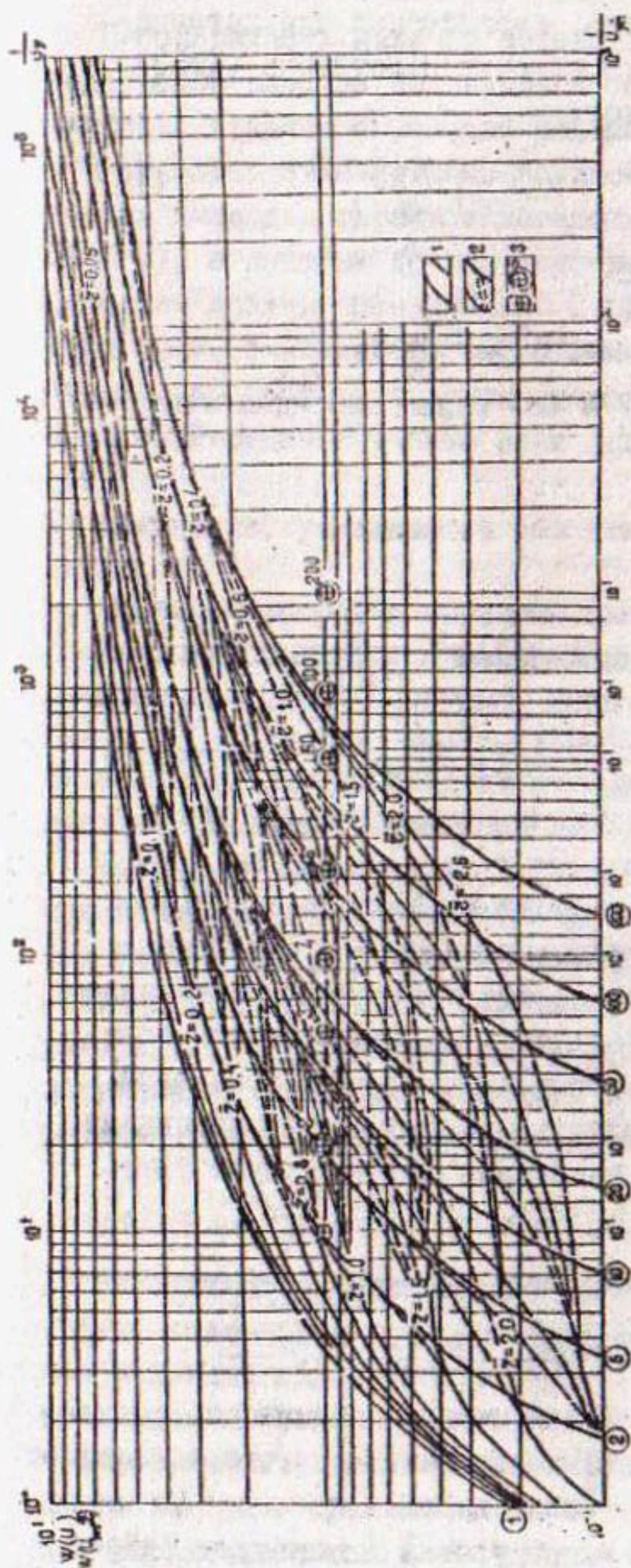


Рис. 8. Эталонные кривые функции $W(\mu_y, \mu_{yn}, \bar{z})$ от μ_y / μ_{yn} , отражающие характер понижения уровня при опробовании напорных и потенциально напорных пластов: 1 — положение эталонных кривых Тейса при различных проявлениях сложившейся водоотдачи; 2 — положение кривых, отражающих проявление перехода от упругой к сложившейся водоотдаче; 3 — расчетные точки с координатами $W(\mu_y, \mu_{yn}, \bar{z}) = 1$, $\mu_y / \mu_{yn} = 10$, определяющие положение кривых Тейса для упругой ($\gamma = \mu_{yn} / \mu_y = 1$) и сложившейся водоотдачи ($\gamma = 2$; 5; 10; 20; 50; 100; 200).

Аналогичный ход снижения уровня, характерный для потенциально напорных пластов, отражен в решении Н. Боултона (1963) для двухслойного водоносного пласта

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W_b(\tau, \bar{z}, \bar{M}), \quad \text{где } \tau = \frac{\chi_n t}{\mu}; \quad (48)$$

$$\bar{z} = z/b, \bar{M} = \frac{\mu^*}{\mu}; \quad \chi_n = \frac{K_n}{m_n}.$$

Нетрудно установить, что так как $b^2 = \frac{km \cdot m_n}{K_n} = \frac{km}{\chi_n}$,

$\tau = \frac{km t}{\mu \cdot b^2} = \frac{\alpha t}{b^2}$, уравнения (47 и 48) полностью идентичны и связаны соотношением:

$$\frac{1}{u} = \frac{4}{z^2} \cdot \tau. \quad (49)$$

На эту величину должно наблюдаться смещение эталонных кривых (47 и 48) с одноименными характеристиками $\bar{z}$ и равенством соотношений водоотдачи $\gamma = \frac{\mu}{\mu^*}$. Значения функции (48) для диапазона соотношений водоотдачи $\bar{M} = \frac{\mu^* + \mu}{\mu^*} \approx \gamma = \frac{\mu}{\mu^*}$, равных 6,5; 20; 34; 100, приведены в табл. 8 (Мироненко, Шестаков, 1978).

Таким образом, уравнения фильтрации Боултона в виде (47 и 48) являются универсальными, описывающими приток к скважине с учетом состояния упругости пласта и отражающими замедление проявления его реальной водоотдачи, и применимы для всех типов водоносных горизонтов. Частным случаем этих уравнений является уравнение Тейса применительно к собственно напорному пласту, для которого реальная водоотдача соответствует упругой.

Совместный учет гетерогенности пласта по упругости и естественного потока подземных вод в пласте

В решениях Боултона (47 и 48) не учтена динамичность подземных вод в пласте, или наличие потока подземных вод, что определяет после проявления реальной водоотдачи пласта в процессе откачек подчинение дальнейшего хода снижения уровня зависимости Тейса, отражающей современное состояние напряженности пласта.

Неоспоримость наличия потока подземных вод во всех типах водоносных пластов не вызывает сомнения и подтверждена анализом хода откачек огромного объема опытно-фильтрационных работ. В частности, стабилизация понижений или тенденция к ней отмечаются даже для глубокозалегающих водоносных пластов (более 1000 м), в которых другие факторы, обеспечивающие этот процесс, не должны проявляться. С другой стороны, в решении Хантуша (37), учитывающем естественный поток подземных вод, не отражен процесс замедления проявления реальной водоотдачи пласта. Решение с учетом этих факторов получено П.П.Нагевичем (1991).

Уравнение, учитывающее оба эти фактора, можно записать в виде

$$S = \frac{Q}{4\pi K m} W(u_y, u_{yn}, \tau/b_d, \tau/\beta_n), \quad (50)$$

где $W(u_y; u_{yn}, \tau/b_d, \tau/\beta_n)$ – функция скважины для различного типа пластов, учитывающая влияние естественного потока и запаздывание проявления реальной водоотдачи.

Численные значения этой функции в пределах первых двух этапов полностью соответствуют функции Хантуша-Джейкоба для упругой фильтрации в условиях перетекания, а в пределах третьего этапа могут быть легко определены введением в зависимость Боултона (47) поправок на уклон потока. Эти поправки могут быть получены из сравнения значений функций Тейса и Хантуша для различных характеристик $\bar{u}_n = \tau/\beta_n$

$$\Delta W(u_{yn}, \tau/\beta_n) = W(u_{yn}) - W(u_{yn}, \tau/\beta_n). \quad (51)$$

Рассчитанные таким образом значения функции $W(u_{yn}, \tau/b, \tau/\beta)$, являющейся аналогом функции Боултона, протабулированы для основных характеристик τ/b_d и τ/β_n и представлены в виде эталонных кривых зависимости ее значений от аргумента I/u_r в билогарифмическом масштабе. Решение предусматривает возможность выхода в пределах III этапа эталонной кривой с фиксированной характеристикой $\bar{u} = \tau/b$ на несколько эталонных кривых, имеющих различные характеристики $\bar{u}_n = \tau/\beta$.

На рис. 9, 10 приведены эталонные кривые функции, отражающие характер понижения уровня соответственно в потенциально напорных $\gamma = 10$ и безнапорных пластах $\gamma = 100$. Они могут быть составлены для более широкого диапазона значений γ .

В табл. 10 приведены значения функции $W(u_{yn}, \tau/\beta, \tau/\beta)$ для эталонных кривых, имеющих характеристики τ/β от 0,2 до 2,0 и выходящих на эталонные кривые с характеристиками $\tau/\beta = 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$. Полное приведение функции ограничено объемом работы.

Характерной особенностью зависимости является отражение в ее численных значениях реального процесса, происходящего при откачке из водоносных горизонтов, когда максимальный темп снижения, соответствующий зависимости Тейса, сивелирован замедлением проявления реальной водоотдачи, а при достижении ею своего максимума — влиянием естественного потока, вызывающего в зависимости от продолжительности откачки полную или частичную стабилизацию понижений даже при сравнительно малых значениях уклона потока (менее 0,01). Этим объясняется отсутствие на графиках временного прослеживания ($S - \rho_{gt}$), четко выраженных прямолинейных участков, отвечающих зависимости Тейса, что не обеспечивает приближения к истинным параметрам пласта при расчете их методами Джейкоба. Вероятность приближения рассчитанных ими параметров ($k_{пр}$) к истинным ($k_{ти}$) в этом случае в значительной степени зависит от соотношения $\bar{\tau}/\bar{\tau}_n$. При больших его значениях относительная ошибка уменьшается, при малых — увеличивается, что достаточно убедительно подтверждается результатами расчета, положенными в основу графика зависимости $\bar{\tau}/\bar{\tau}_n$ от $\Delta = \frac{k_{пр}}{k_{ти}}$ (рис. 11).

Убедительным доказательством реальности проявления гетерогенности пласта по упругости для всех типов водоносных пластов, при влиянии различных питающих факторов (в т.ч. и естественного потока подземных вод) являются графики прослеживания понижения во времени (рис. 12, а-г). На них четко прослеживается зависимость времени проявления реальной водоотдачи пласта от глубины залегания водоносных пластов в плиоцен-четвертичных отложениях (рис. 12, а-г) и правомерность проявления

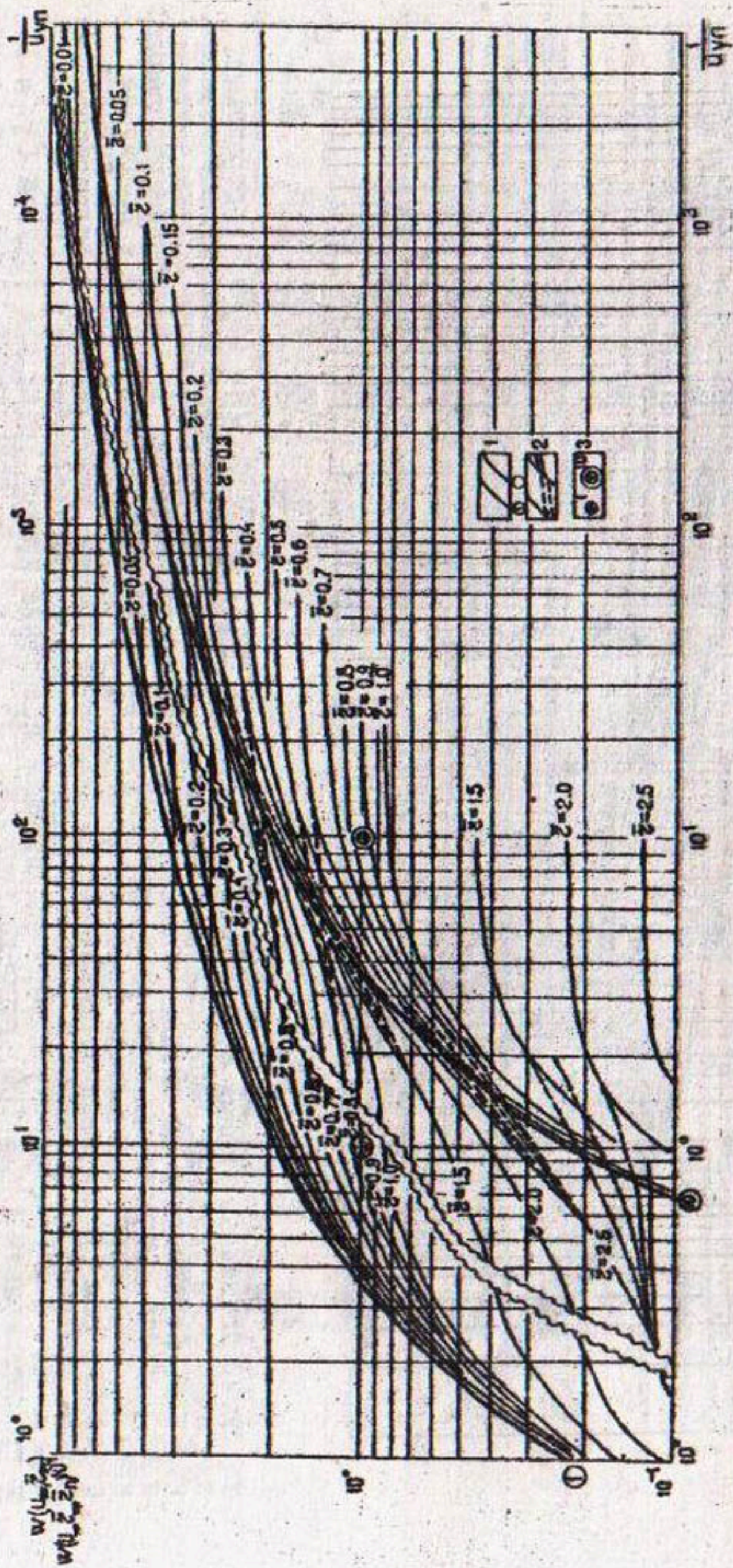


Рис. 9. Эталонные кривые функции $W(u, z, u)$ от u (u), отражающие характер понижения уровня при опробовании потенциально напорных и квазинапорных пластов в условиях формирования расхода откачки за счет естественного потока подземных вод, перетекания из смежных пластов через разделяющие слои: 1 - положение эталонных кривых Тейса, отскакивающих прояснение упругой и реальной (сложившейся) водоотдачи; 2 - положение кривых, отражающих проявление перехода от упругой к сложившейся водоотдаче и питание подземных вод пласта (формирование расхода откачки за счет потока и перетекания); 3 - расчетные точки с координатами функции $W(u, z, u)$, $z = 10$, определяющих положение кривых Тейса для упругой ($z = 1$) и сложившейся ($z = 10$) водоотдачи.

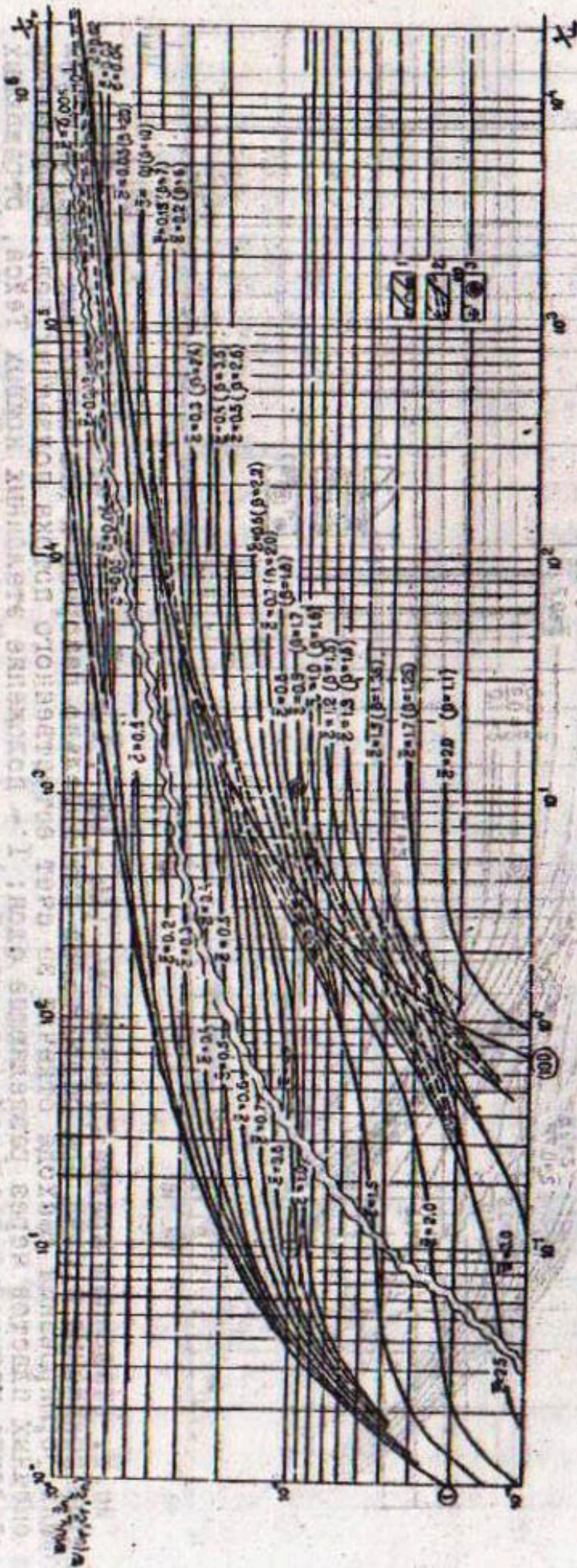
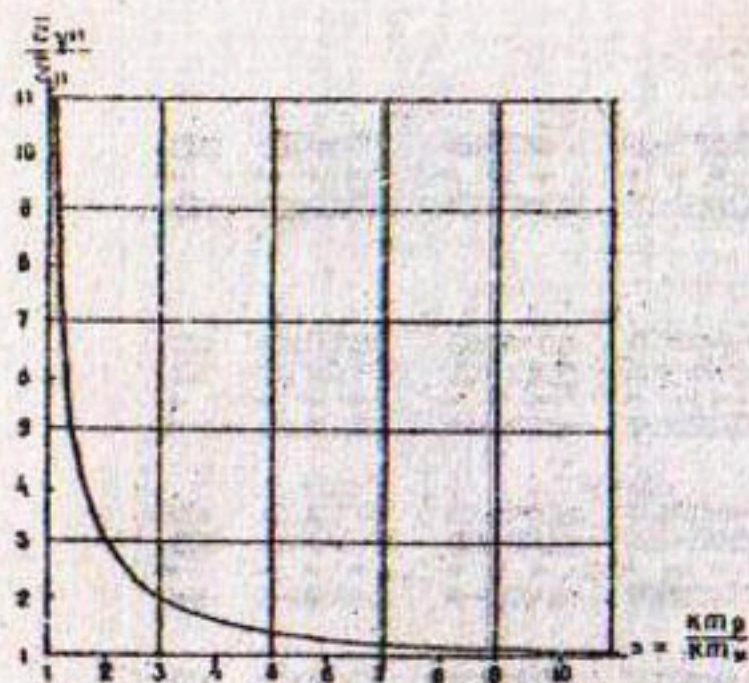


Рис. 10. Эталонные кривые функции $W(u_r, u_r, \bar{z}_r, \bar{z}_n)$ от $1/u_r$ ($1/u_r$), отражающие характер понижения уровня при опробовании потенциально безнапорных и собственно безнапорных пластов в условиях формирования расхода откачки за счет естественного потока подземных вод, перетекания из смежных пластов, дополнительного питания: 1 - положение эталонных кривых Фейса, отражающих проявление упругой и гравитационной водоотдачи; 2 - положение кривых, отражающих проявление перехода от упругой к гравитационной водоотдаче и питание подземных вод (формирование расхода откачки за счет потока, перетекания, инфильтрационных потерь поверхностного стока и т.д.); 3 - расчетные точки с координатами функции $W(u_r, \bar{z}_n, \bar{z}_n) = 1, (1/u_r) = 10$, определяющих положение кривых Фейса для упругой ($\chi = 1$) и гравитационной ($\chi = 100$) водоотдачи.

Значения функции скважины $W(u_r, \bar{u}, \bar{u}_n)$ - безнапорный пласт
с замедленным проявлением гравитационной водоотдачи
и естественным потоком подземных вод

$\bar{u} = \frac{u}{u_n}$	$\bar{u}/u_r$										$\bar{u}_n = \frac{u}{u_n}$	
	1	2	5	10	20	50	10^2	$5 \cdot 10^2$	10^3	10^4	10^5	$\bar{u}_n$
0,2	3,5 3,5	3,51 3,51	3,52 3,52	3,60 3,58	3,65 3,00	3,95 3,84	4,24 4,08	4,38 4,67	5,79 4,82	6,23 4,85	6,23 4,85	0,05 0,1
0,4	2,25 2,25 2,25	2,3 2,3 2,3	2,4 2,4 2,37	2,53 2,53 2,5	2,31 0,8 2,73	3,79 3,29 3,11	3,34 3,78 3,25	5,25 4,67 3,47	5,79 4,82 3,51	6,23 4,85 3,51	6,23 4,85 3,51	0,05 0,1 0,2
0,6	1,6 1,6 1,6	1,7 1,7 1,69	1,85 1,82 1,79	2,13 2,1 1,95	2,51 2,44 2,22	3,19 3,0 2,42	2,81 3,28 2,71	4,7 3,5 2,73	4,82 3,51 2,74	4,85 3,51 2,74	4,85 3,51 2,74	0,1 0,2 0,3
0,8	1,24 1,24 1,24 1,24	1,34 1,34 1,33 1,32	1,6 1,57 1,54 1,49	1,88 1,85 1,7 1,64	2,41 2,33 2,12 1,91	3,19 3,01 2,57 2,13	3,81 3,28 2,71 2,22	4,67 3,47 2,72 2,29	4,83 3,51 2,74 2,22	4,86 3,51 2,74 2,226	4,86 3,51 2,74 2,23	0,1 0,2 0,3 0,4
1,0	0,99 0,99 0,99	1,15 1,15 1,15	1,5 1,5 1,5	1,96 1,85 1,62	2,5 2,3 1,75	3,11 2,56 1,84	3,57 2,71 1,85	4,00 2,73 1,85	4,06 2,74 1,85	4,06 2,74 1,85	4,06 2,74 1,85	0,15 0,3 0,5
1,5	0,65 0,65 0,65	0,85 0,85 0,85	1,30 1,3 1,25	1,85 1,7 1,5	2,30 1,95 1,65	2,60 2,15 1,83	2,70 2,2 1,84	2,72 2,22 1,85	2,74 2,22 1,85	2,74 2,226 1,85	2,74 2,23 1,85	0,3 0,4 0,5
2,0	0,48	0,7	1,14	1,44	1,62	1,84	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	0,5



гетерогенного пласта по упругости для пластов в более древних отложениях мелового возраста (рис. 12, д).

Рис. 11. График зависимости относительной ошибки $\Delta = \frac{K_{тр}}{K_{ти}}$ от $\bar{i}_{уп}/\bar{i}_a$ при расчете $K_{тр}$ методом временного прослеживания.

Роль граничных и начальных условий пласта в плане и разрезе и их отражение в расчетных зависимостях

Гетерогенность пласта по упругости и естественный поток подземных вод в пласте отражают региональные закономерности формирования как отложений, слагающих пласт, так и ресурсов подземных вод за пределами области питания откачки и характерны для водоносных горизонтов всех типов. Региональные ресурсы определяют количество сложившихся запасов подземных вод непосредственно в районе расположения опытной скважины, проявляющихся здесь в различном виде (перетекание из пласта в смежные, естественная разгрузка на выклинивание, дренирование водотоками, испарение). Они, как и местное инфильтрационное питание, существенно влияют на структуру дебита откачки (табл. 2) и на достоверность оценки параметров пласта соответственно.

Рассмотрим роль каждого из этих факторов в процессе формирования расходов откачки и создаваемых понижений в пределах воронки депрессии.

Перетекание через слабопроницаемые разделяющие слои

Оно проявляется, как правило, в квазинапорных гетерогенных по упругости пластах. Понижение в пласте под влиянием откачки может быть описано зависимостью (50), в которой место β_n (параметра интенсивности питания за счет потока подземных вод) занимает параметр перетекания B .

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W\left(u, u_{up}, \frac{z}{B_d}, \frac{z}{B}\right). \quad (52)$$

Значения функции $W\left(u_{up}, \frac{z}{B_d}, \frac{z}{B}\right)$ аналогичны приведенным в табл. 10, эталонные кривые для соотношения водоотдачи $Y = 10$ отражены на рис. 9.

При наличии естественного потока его влияние в отдельных случаях и, особенно, для удаленных пьезометров сопоставимо с влиянием перетекания. В этом случае в уравнение (52) вводится комплексный параметр B_n , учитывающий оба фактора

$$\frac{1}{B_n^2} = \frac{1}{B^2} + \frac{1}{B_p^2}. \quad (53)$$

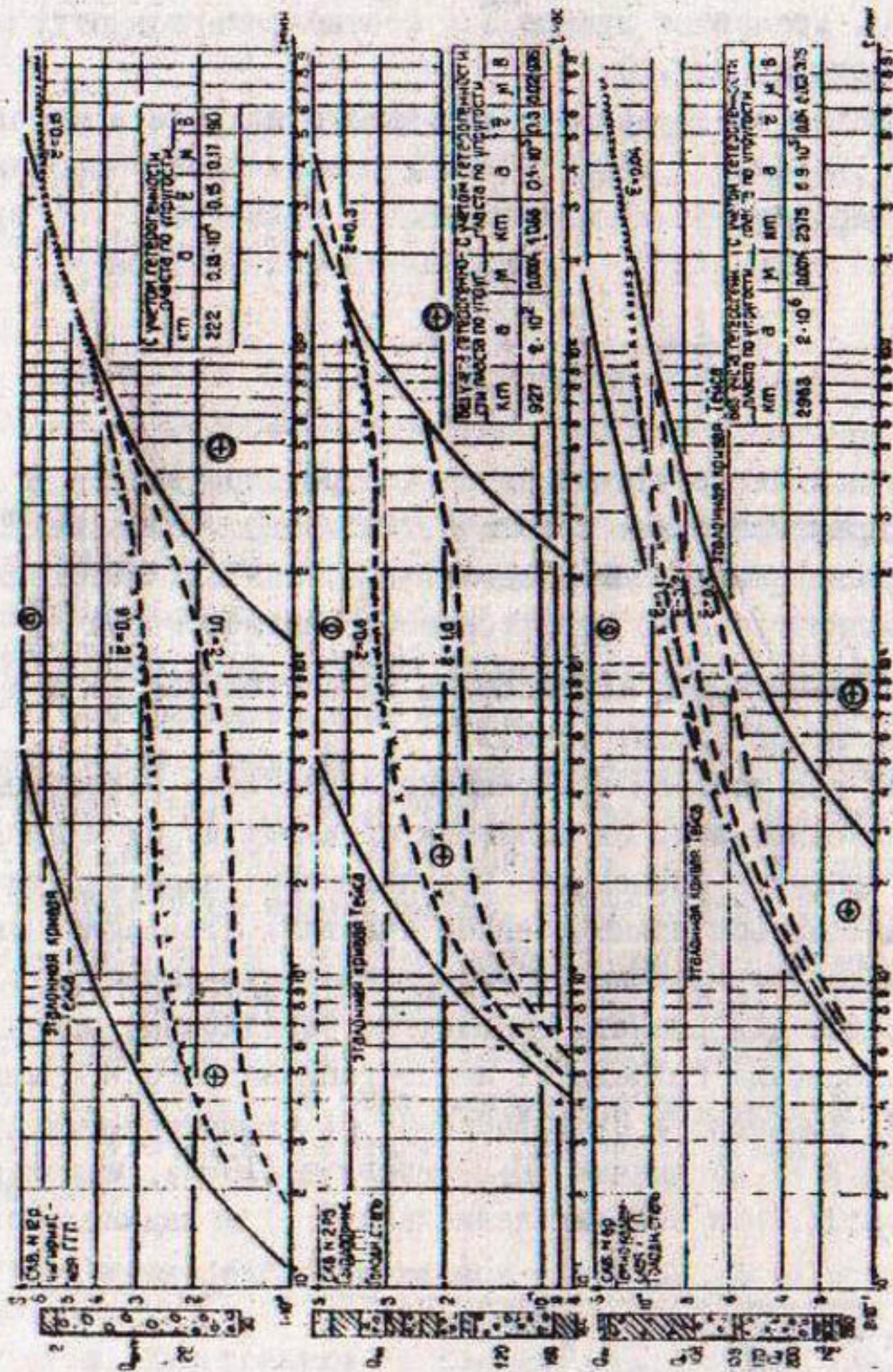
В конечном итоге уточнение параметра перетекания B при известных характеристиках потока B_p позволяет откорректировать и коэффициент фильтрации разделяющего слоя K_p . Необходимость корректировки особенно существенно проявляется при $\frac{B_p}{B} < 2-3$.

При больших величинах соотношения относительная ошибка в определении K_p не превышает 10-20%.

В целом для условий перетекания и действия естественного потока подземных вод, описываемых сходными по сути зависимостями, на графиках временного прослеживания практически не должны наблюдаться прямолинейные участки, отвечающие зависимостям Тейса, отражающим упругую и реальную водоотдачу пласта. Использование для расчета параметров осредненных прямых на участках перехода графика от ложностационарного к стационарному этапам, приводит к существенному их завышению. Относительная ошибка Δ , по данным П.П.Нагевича (1984), может достигать 500-600% (при больших величинах $\bar{z}$) и подчиняться зависимости

$$\Delta = \frac{C_t}{C_t(\bar{z})} - 1 = e^{z/B} - 1, \quad (54)$$

где $C_t, C_t(\bar{z})$ - угловые коэффициенты прямых, отвечающих зависимостям Тейса для напорного пласта и Хантуша-Джейкоба для условий перетекания соответственно.



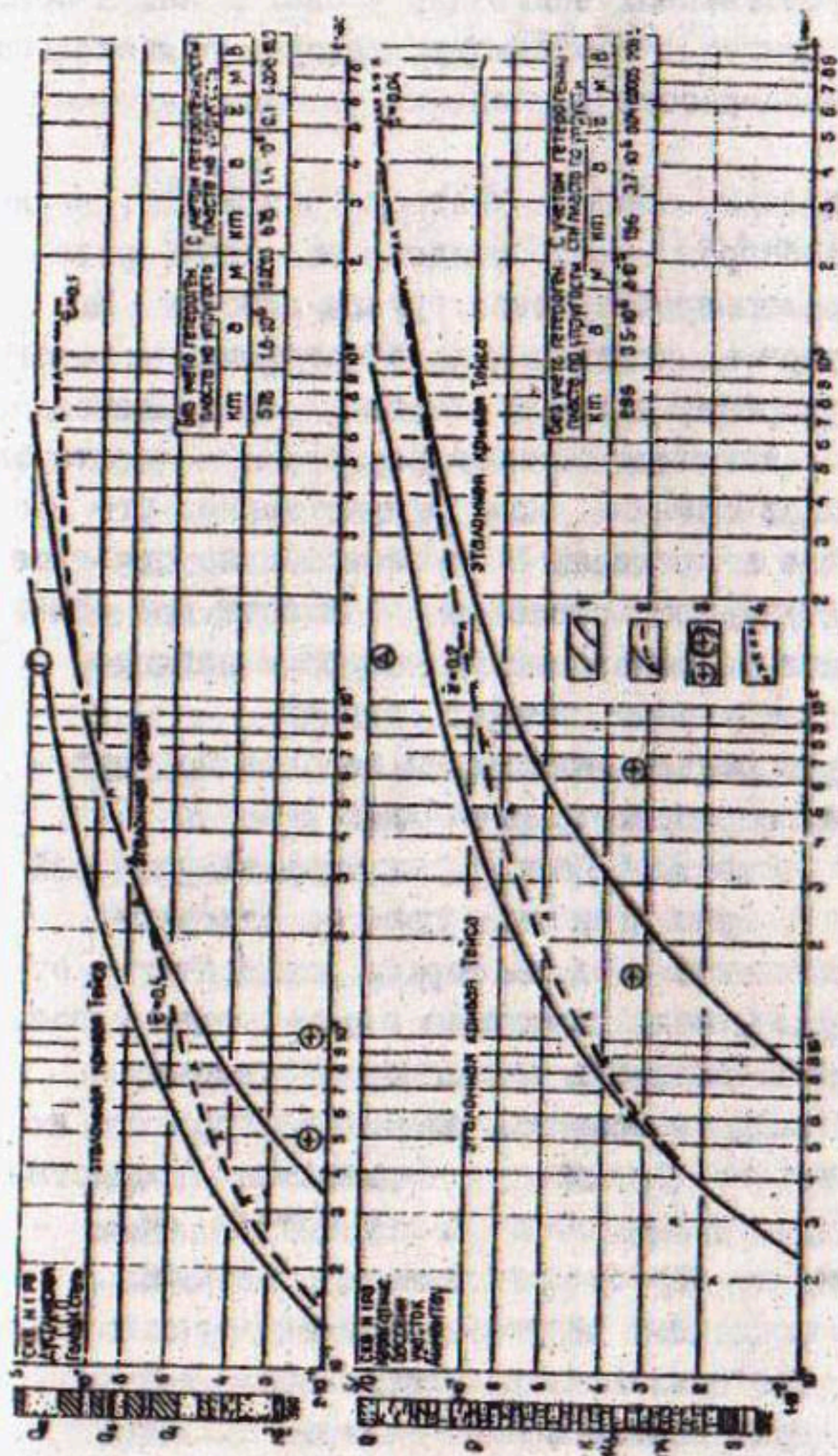


Рис. 12. Типовые фактические графики прослеживания понижений во времени по результатам опробования различных типов водоносных горизонтов. определяемых их глубиной залегания. Водоносные горизонты: а - безнапорный; б, в - квазинапорные; г, д - потенциально напорные. 1, 2, 3 - усл. обозн. см. на рис. 8-10; 4 - фактические точки зависимости.

Зависимость (52) применима при условии, что расход потока и перетекания из смежных пластов полностью компенсирует расход откачки, не вызывая существенных понижений уровня в них и обеспечивая выдержанность критерия постоянства напора, обязательно-го для обоснования правомерности применения решения Хантуша-Джейкоба.

При опробовании отдельных пластов многослойной толщи, взаимодействующих через слабопроницаемые разделяющие слои, роль питающего смежного пласта берет на себя группа пластов. Их участие проявляется путем последовательного привлечения такого количества пластов в разрезе, которое обеспечивает компенсацию дебита откачки сверх сложившихся запасов опробуемого пласта за счет привлекаемых запасов смежных. На графиках временного прослеживания в этом случае в пределах III этапа возможно нечеткое проявление воздействия каждого привлекаемого пласта при общей тенденции к стабилизации, обусловленной суммарным влиянием всех пластов, вовлеченных в зону питания откачки.

При оценке параметров разделяющих слоев необходимо учитывать различие в напорах опробуемого и смежных пластов. Так, в условиях естественной восходящей фильтрации, характеризующейся уменьшением напоров с приближением к поверхности земли, верхний смежный слой начнет влиять на формирование дебита откачки только в том случае, если понижение в опробуемом пласте

S_0 существенно превысит разность его напоров и верхнего смежного пласта $\Delta H_{0-в}$. Здесь возможны следующие варианты их взаимоотношений при откачке: $S_0 < \Delta H_{0-в}$ - уменьшение естественного перетекания из опробуемого пласта в верхний; $S_0 \approx \Delta H_{0-в}$ - прекращение перетекания из опробуемого пласта в верхний;

$S_0 > \Delta H_{0-в}$ начало нисходящего перетекания в опробуемый пласт. Удельный расход перетекания из верхнего пласта в опробуемый $q_{в-0}$ в этом случае определяется зависимостью

$$q_{в-0} = K_в \left(\frac{S_0 - \Delta H_{0-в}}{m_в} \right). \quad (55)$$

В то же время участие нижележащего пласта, обеспечивающего постоянную восходящую фильтрацию в опробуемый пласт как в естественных условиях, так и при откачке, является определяющим, что

видно из выражения удельного расхода перетекания из нижнего пласта и сопоставления его с расходом из верхнего:

$$q_{н-0} = K_n \left(\frac{S_0 + \Delta H_{0-н}}{m_{0-н}} \right) \quad (56)$$

$$\frac{q_{н-0}}{q_{в-0}} = \frac{K_n \cdot m_v (S_0 + \Delta H_{0-н})}{K_v \cdot m_n (S_0 - \Delta H_{0-в})} \quad (57)$$

где K_n , K_v , m_n , m_v — коэффициенты фильтрации и мощности нижнего и верхнего разделяющих слоев; $\Delta H_{0-в}$, $\Delta H_{0-н}$ — разность напоров в естественных условиях между опробуемым верхним и нижним пластами соответственно.

Из зависимостей ясно, что при $S_0 \leq \Delta H_{0-в}$ верхний пласт не участвует в питании откачки, хотя понижения и будут наблюдаться за счет сокращения восходящей фильтрации, вызванного откачкой. При таком варианте III этап на графиках прослеживания отражает влияние только нижнего смежного пласта и характеризует фильтрационные свойства слоя, отделяющего его от опробуемого.

В случае часто встречаемого на практике группового опробования многослойной водоносной толщи (как правило, три опытные скважины с ярусной конструкцией фильтров, охватывающих в пределах каждого яруса один или несколько пластов при аналогичной конструкции пьезометров) на графиках временного прослеживания действие откачки из каждого яруса должно проявляться как при опробовании следующих характерных типов пластов: верхний ярус — квазинапорный пласт с перетеканием из вышележащих смежных пластов; средний ярус — потенциально напорный изолированный пласт; нижний ярус — квазинапорный пласт с перетеканием из нижележащих смежных пластов.

Различие напоров в пластах может вызвать некоторое отступление от отмеченных особенностей, в которых можно разобраться, проанализировав взаимоотношения пластов.

Учет влияния реки

Группа питающих факторов, влияющих на структуру дебита откачки в безнапорном водоносном горизонте и, как правило, при-

водящих к существенному завышению рассчитанных параметров пласта, требует более внимательного рассмотрения. Среди них теоретически обоснованным является только учет влияния реки на работу приречных скважин. Однако и здесь неучет некоторых нюансов также может привести к значительным ошибкам. Имеющиеся решения (Форхгеймер, В.М.Шестаков, Ф.М.Бочевеер) рассчитаны на рассмотрение реки в виде прямолинейной границы определенной ширины (большой, малой) с условиями постоянства напора (I рода) или изменяющегося от разности напора в реке и пласте расхода (III рода). Среди этих решений, в основе которых лежат зависимости (II, I2) претензии могут быть только к уравнениям неустановившегося движения, в которых не учтен процесс замедления проявления гравитационной водоотдачи, характерный для безнапорных пластов, т.е. зависимость (I2) отражает только роль реки с постоянным напором. Совместное влияние этих факторов может быть отражено зависимостью, принцип вывода которой использован при получении решения (50) для учета естественного потока подземных вод путем введения в решение Боултона (47) поправок для различных характеристик $\beta_p = \frac{\rho}{\gamma}$

$$\Delta W(\beta_p, u_r) = W(u_r) - W(\beta_p, u_r). \quad (58)$$

Окончательный вид уравнения, описывающего понижение уровня в безнапорном пласте при откачке из приречной скважины, может быть представлен как

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W(u_y, \beta_p, u_r, \frac{\tau}{\beta_A}), \quad (59)$$

где $W(u_y, \beta_p, u_r, \frac{\tau}{\beta_A})$ - функция скважины, учитывающая влияние реки и запаздывание проявления гравитационной водоотдачи. Численные значения функции приведены в табл. II и близки к функциям скважины, учитывающей естественный поток и перетекание (табл. IO). Графики эталонных кривых этой функции практически совпадают с вышеуказанными применительно к безнапорному пласту (рис. IO), на которых кривые с характеристикой $\bar{\tau} = \frac{\tau}{\beta_A}$ переходят в пределах III и IV эталон в кривые с харак-

Значения функции скважины в безнапорном пласте с замедленным
проявлением гравитационной водоотдачи и влиянием реки

$\bar{z} = \frac{z}{B_A}$	I / u_r												$\beta = \frac{\rho}{z}$	$\bar{z} = \frac{z}{B_P}$
	I	2	3	4	5	10	50	10^2	$5 \cdot 10^2$	10^3	10^4	10^5		
I	2	3	4	5	10	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,2	3,5 3,5 3,5	3,51 3,51 3,51	3,52 3,52 3,52	3,6 3,6 3,6	3,90 3,95 3,95	4,08 4,3 4,3	4,38 5,29 5,59	4,51 5,63 0,24	4,54 5,9 7,16	4,6 5,98 7,36	10 20 40	0,1 0,05 0,02		
0,4	2,25 2,25 2,25 2,25	2,28 2,28 2,28 2,28	2,39 2,4 2,4 2,4	2,47 2,55 2,55 2,55	2,59 3,24 3,582 3,78	2,72 3,48 4,01 4,38	2,76 3,56 4,1 4,51	2,77 3,58 4,18 4,6	2,77 3,58 4,18 4,6	2,77 3,58 4,18 4,6	4 6 8 10	0,3 0,2 0,14 0,1		
0,8	1,24 1,24 1,24 1,24	1,25 1,35 1,35 1,35	1,29 1,45 1,54 1,59	1,3 1,56 1,72 1,92	1,33 1,73 1,92 2,45	1,35 1,77 1,12 2,62	1,36 1,81 2,16 2,74	1,38 1,83 2,19 2,76	1,38 1,83 2,19 2,77	1,38 1,83 2,19 2,77	2 2,5 3,0 4,0	0,7 0,55 0,45 0,3		
0,6	1,6 1,6 1,6 1,6	1,68 1,68 1,68 1,68	1,79 1,84 1,85 1,85	1,87 2,07 2,15 2,15	1,92 2,5 2,94 3,25	2,1 2,6 3,27 3,81	2,17 2,75 3,51 4,41	2,19 2,76 3,56 4,54	2,19 2,77 3,58 4,54	2,19 2,77 3,58 4,6	3 4 6 10	0,45 0,3 0,2 0,1		
1,0	0,97 0,97 0,97	1,12 1,19 1,2	1,19 1,44 1,5	1,3 1,72 2,0	1,33 1,92 2,99	1,35 2,11 3,27	1,36 2,18 3,48	1,36 2,19 3,56	1,38 2,19 3,58	1,36 2,19 3,58	20 3,0 6,0	0,7 0,45 0,2		

Продолжение табл. II

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1,5	0,65	0,88	1,04	1,2	1,33	1,36	1,37	1,38	1,38	1,38	2,0	0,7
2,0	0,48	0,78	0,97	1,15	1,33	1,36	1,37	1,38	1,38	1,38	2,0	0,7
3,0	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,28	1,1	2,0
	0,25	0,29	0,32	0,33	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	1,2	1,5
	0,32	0,49	0,62	0,7	0,79	0,79	0,81	0,81	0,81	0,81	1,5	1,35
	0,34	0,67	0,94	1,12	1,33	1,36	1,37	1,38	1,38	1,38	2,0	0,7

теристиками $\beta_n = \frac{\rho}{\tau}$, отражающими положение пьезометра относительно опытной скважины и реки. В то же время они близки к эталонным кривым с характеристикой $\bar{\tau}_p = \frac{\tau}{B_p}$, где параметр B_p , характеризующий удаленность источника питания откачки, равен $B_p = 2L$. Связь характеристик β_p и $\bar{\tau}_p$ приведена на рис. 13. В итоге зависимость (59) принимает вид решения Форхгеймера для скважины у реки (12).

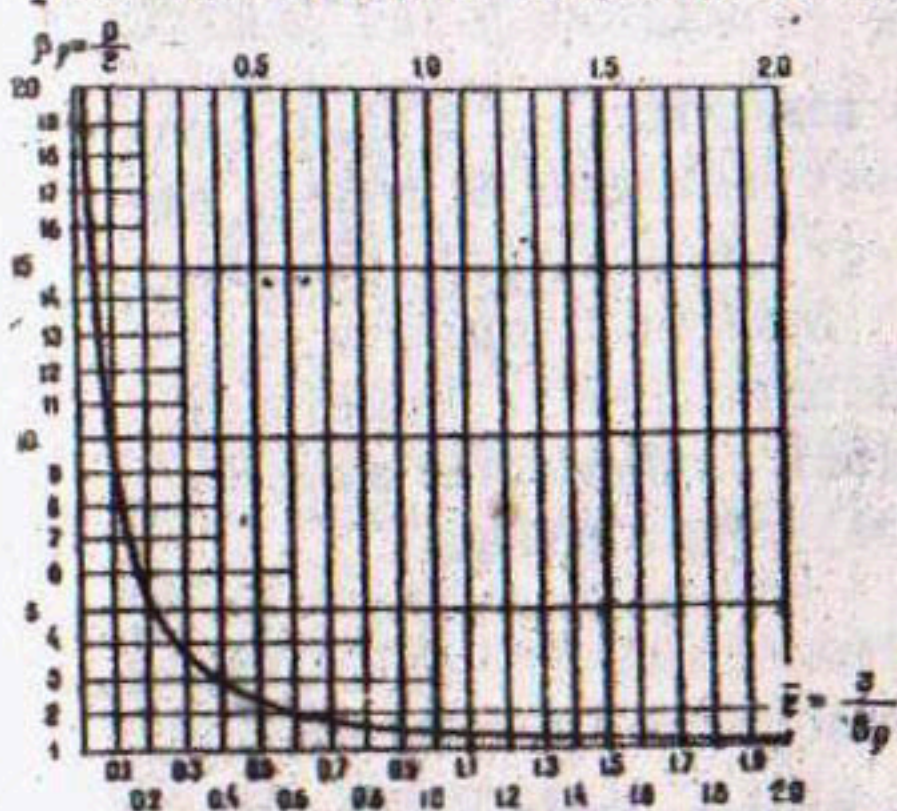


Рис. 13. График связи показателей эталонных кривых β_p и $\bar{\tau}_p$.

Неучтенные факторы, влияющие на достоверность оценки параметров при интерпретации откачек из приречных скважин, следующие:

конфигурация русла реки в области возможного влияния откачки;

наличие дополнительных протоков реки, искусственных водотоков, расход которых сопоставим с расходами откачки;

высотное положение уровня воды в реке и зеркала подземных вод и их взаимоотношение;

прирусловое выклинивание подземных вод;

испарение подземных вод с их зеркала и влаголюбивой растительностью;

естественный поток подземных вод, его взаимоотношение с рекой.

Выполненное моделирование работы скважин с учетом этих факторов (Сергеева, Сулейманов, 1992 г.) позволило оценить их немаловажную роль только на качественном уровне. Решение этого вопроса требует дальнейших исследований. Однако важность учета этих факторов неоспорима.

В настоящее время представляется возможность учета части тех факторов, влияние которых можно свести к дополнительной линейно вытянутой и параллельной реке границе (протоки, дрены). Положение реки и этой границы отражено в решении, приведенном в работе Нагевича (1989), аналогичном уравнению Форхгеймера, в

котором вместо $\rho_9(\frac{p}{r})$ введен

$$\rho_9(\frac{\bar{p}}{r}) = \frac{\rho_9 \frac{\bar{p}_\lambda}{r_\lambda} \cdot \rho_9 \frac{\bar{p}_n}{r_n}}{\rho_9 \frac{\bar{p}_\lambda}{r_\lambda} + \rho_9 \frac{\bar{p}_n}{r_n}}, \quad (60)$$

где $\bar{p}_n, \bar{p}_\lambda$ - расстояние до отображенных скважин относительно правой и левой границ.

При наличии естественного потока подземных вод в зависимости от его взаимоотношения с рекой роль последней в питании откачки может существенно изменяться (от максимального участия до полного отсутствия влияния реки). Возможные варианты схем взаимодействия приведены в работе Нагевича (1984). Совместное проявление реки и потока в решении (59) отображается введением в аргумент функции комплексного параметра питания

$$\frac{I}{B^2} = \frac{I}{B_p^2} + \frac{I}{\beta^2 p} \quad (61)$$

При этом зависимость (59) может быть представлена в виде:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W(u_y, u_r, \frac{r}{B_d}; \frac{r}{B}). \quad (62)$$

Функция скважины в этом выражении аналогична функции в решении (59) (табл. II, рис. 10).

Учет местного площадного питания или разгрузки подземных вод

Безнапорные водоносные горизонты в аридной зоне с широким развитием орошаемого земледелия, помимо существования естественного потока подземных вод, характеризуются различными условиями на их свободной поверхности или факторами, искажающими ход снижения уровня при откачке. К их числу относятся инфильтрация поверхностных вод на зеркало подземных (местное питание горизонта) или испарение с их зеркала (разгрузка водоносного горизонта). В условиях Центральной Азии процессы питания

подземных вод за счет полива орошаемых площадей и их разгрузки на испарение проявляются довольно существенно.

Так, для подземных вод речных долин питание за счет потерь оросительных вод составляет значительную часть сложившихся запасов, что отражается как в повышении их зеркала в период поливов, так и при наличии искусственных дренажных систем, ограничивающих их подъем, в увеличении расхода дренажного стока. Дренированность территории определяет и сдерживает величину приращения мощности водоносного горизонта, сформированную этим дополнительным питанием. Запасы, помимо дренирования, расходуются в результате испарения с зеркала подземных вод, поверхности почвы и транспирации растительностью. Годовое испарение значительно превышает общее количество выпадающих атмосферных осадков. По данным Л.Я.Джогана (1989), среднее испарение по шести ключевым участкам Средней Азии составляет 994 мм в год. Из них на транспирацию растениями (хлопчатник) идет 525 мм, испарение с почвы и зоны аэрации – 369 мм (средняя величина атмосферных осадков – 278 мм). По данным К.Г.Ганиева (1979), величина испарения в вегетационный период составляет 500–700 мм. Максимальная величина испарения в долине р.Чирчик зафиксирована в 860 мм, что при равномерной в течение всего периода интенсивности испарения в месяц составляет 123 мм или 4 мм/сут. Максимальное испарение за месяц 254 мм наблюдалось в сентябре на хлопковых полях при глубине залегания УПВ 1 м (годовое – 941,7 мм).

В.Н.Пономарев (1989) отметил, что при водоподаче на площадь, занятой посевами хлопчатника, в 9,2 тыс.м³/га общие потери на пополнение запасов подземных вод и суммарное испарение составляют 6 тыс.м³/га, при этом на уровень подземных вод поступает 2,1, а на транспирацию и испарение – 3,9 тыс.м³/га. На площадях, занятых влаголюбивыми культурами, при водоподаче в 28,7 тыс.м³/га 56% (16,21 тыс.м³/га) уходит на пополнение запасов и выклинивание в дрены, а 44% – на испарение с открытой водной поверхности и транспирацию растениями.

Безнапорный водоносный горизонт при наличии инфильтрации поверхностных вод или испарения подземных вод характеризуется

следующими особенностями:

движение воды осуществляется через зону аэрации, пропускная способность которой зависит от ее мощности m_a , коэффициента фильтрации K_a и гидротермических условий на поверхности земли;

эти процессы приводят к изменению уровня подземных вод, т.е. к приросту или сокращению мощности водоносного горизонта;

процессы осуществляются в вертикальном направлении на большой площади развития пласта;

их интенсивность подчиняется изменению по глубине, общие принципиальные закономерности которого выявлены довольно условно (Ганиев, Крылов, Палковский, 1986 г.).

Инфильтрационное питание, поступающее на свободную поверхность зеркала подземных вод, снижающуюся в процессе откачки, частично компенсирует расход откачки, приводя в отдельных случаях к стабилизации понижений.

Исходя из этого при наличии инфильтрационного питания безнапорный пласт можно рассматривать как двухслойный, в котором роль покровного слоя выполняет зона аэрации. Через нее вода поступает на свободную поверхность. При выдержанности периода питания за счет атмосферных осадков или оросительных вод по своему характеру оно аналогично процессу перетекания через разделяющий слой, роль которого играет зона аэрации.

При испарении наблюдается аналогичная картина. В естественных условиях за счет испарения с зеркала подземных вод уже осушена определенная мощность водоносного горизонта Δh_0 , которая при отсутствии испарения полностью была бы насыщена водой. Испарение в зависимости от глубины залегания уровня подземных вод и температурного режима на поверхности земли, происходит с непостоянной интенсивностью. Однако при непродолжительных откачках и неизменности температурного режима на поверхности ее интенсивность можно принять постоянной.

При откачке уменьшается разгрузка подземных вод на испарение. Вследствие понижения зеркала подземных вод то количество воды, которое в естественных условиях испарялось с зеркала подземных вод, частично или полностью идет на питание откачки.

В этом случае возникает видимость дополнительного питания откачки в пределах сформированной воронки депрессии, хотя "де-факто" этот процесс связан с перераспределением статей баланса, участвующих в питании откачки подземных вод. При этом питание поступает на зеркало подземных вод, что аналогично по своему воздействию поступлению воды в водоносный пласт через разделяющий слой при схеме перетекания, а по характеру проявления процесса - увеличение привлекаемого расхода (за счет сокращения испарения) с увеличением разности напоров (понижений) - полностью идентично границе III рода в разрезе.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что процесс снижения уровня в этом случае должен отвечать зависимости (52) применительно к безнапорному пласту, в которой место параметра перетекания B должен занять параметр интенсивности питания за счет или инфильтрации, или сокращения испарения B_w :

$$S = \frac{Q}{4\pi k_m} W(u_y, u_r, \frac{r}{R_d}; \frac{r}{B_w}) \quad (63)$$

Уравнение применимо лишь при условии установившегося процесса взаимоотношения статей естественного баланса подземных вод в пределах сформированной откачкой воронки депрессии, что должно отражаться в постоянстве положения естественного зеркала подземных вод в период всего опыта, т.е. должна соблюдаться неизменность начальных условий (статические уровни перед началом опыта и после окончания восстановления одинаковы).

Влияние изменения начальных и граничных условий на ход откачки и оценка возможности их учета

На практике опытные откачки в безнапорных пластах проводятся в основном при изменяющихся начальных условиях, когда происходят естественный спад или подъем уровней на величину, сопоставимую с понижениями, создаваемыми откачкой. Причина такого явления - изменение условий на удаленных границах там, где формируются региональные ресурсы подземных вод, которые проявляются на опытном участке сложившимися запасами (емкость,

поток) и, безусловно, отражаются в положении уровней на участке опробования. Такие условия наиболее характерны для головной части конусов выноса и расширенных участков речных долин, где годовые амплитуды колебания уровня 10 м и более.

Учет естественного изменения уровня подземных вод при интерпретации откачек в настоящее время сводится к определению темпа изменения уровня (Бородин, 1961). При этом принимается линейная связь между двумя статическими уровнями — перед началом откачки и после ее окончания при завершении восстановления. Подсчитанные таким образом величины естественного изменения уровня относительно первоначального вводятся как поправки в понижения $\pm \Delta h_e$ на расчетные моменты времени. Такой подход приводит к небольшим величинам понижений (0,5 м и менее) как при спаде, так и при подъеме естественных уровней. Расчеты с использованием этих понижений приводят к нереальным, явно завышенным, значениям параметра водопроницаемости и неоднозначным параметрам уровнестойкости.

Причиной такого положения является игнорирование особенностей процесса питания откачки в подобных условиях, которые можно расшифровать следующим образом:

в естественных условиях сложившиеся запасы в пределах опробуемого участка отражают баланс подземного притока, формируемого региональными ресурсами подземных вод на площадях выше участка задолго до начала откачки (месяц и более) и подземного оттока, отражающего влияние преимущественно региональной разгрузки водоносного горизонта на значительном удалении от участка;

превышение притока подземных вод к участку над оттоком или наоборот приводит или к интенсивному подъему зеркала подземных вод в пределах участка, или к его интенсивному спаду;

откачка из скважины формирует свою, местную, искусственную зону разгрузки в пределах воронки депрессии соответствующую области питания откачки, которая перехватывает часть потока подземных вод, уменьшая интенсивность региональной разгрузки на объем воды, отобранной за весь период откачки;

вся вода, находящаяся в пределах области питания откачки,

не может выйти за ее границы. Поэтому любые изменения в положении естественного зеркала подземных вод, характеризующие обработку или накопление определенного объема емкостных запасов, в любом случае усиливают питание откачки. В ее расходе этот объем составляет долю, иногда значительно превосходящую объем емкостных запасов, приуроченных к незначительно изменяющейся во времени воронке депрессии. Структура источников питания откачки в этом случае зависит от соотношения срезов уровней, вызываемых естественной Δh_e и искусственной S_n разгрузкой $\frac{\Delta h_e}{S_n}$;

при откачке на фоне естественного спада уровня объем воды, приуроченный к зоне естественной разгрузки за период откачки, полностью идет на формирование ее дебита. Этот процесс наглядно отражен на рис. 14, 16, из которого видно несоответствие фиксируемого в процессе откачки объема емкостных запасов и их реального объема, отбираемого скважиной. Аналогичный процесс наблюдается и при восстановлении уровня после откачки, которое происходит очень быстро опять-таки за счет объема емкостных запасов зоны региональной разгрузки и ее разрушающего воздействия на воронку депрессии;

при откачке на фоне подъема уровня естественное накопление емкостных запасов способствует интенсивному питанию откачки за их счет и сдерживанию развития воронки депрессии. Ее фиксируемые размеры не отражают реальный объем отобранной откачкой воды (рис. 14, 26). Аналогичный процесс наблюдается и при восстановлении уровня после откачки, способствуя быстрому заполнению воронки депрессии. Опыт проводится как бы в условиях интенсивного питания подземных вод участка.

Таким образом, необходим учет в расчетах параметров объема запасов, приуроченных к зоне естественного изменения уровня, а также интенсивности питания, связанного с подъемом уровня. При этом возможны несколько вариантов описания этих процессов в зависимости от наличия информации по уровням в процессе опыта (откачка и полное восстановление).

При спаде уровня наличие информации по понижениям уровня $S_p = S_n$ (рис. 14, 16) подразумевает соответствие хода снижения

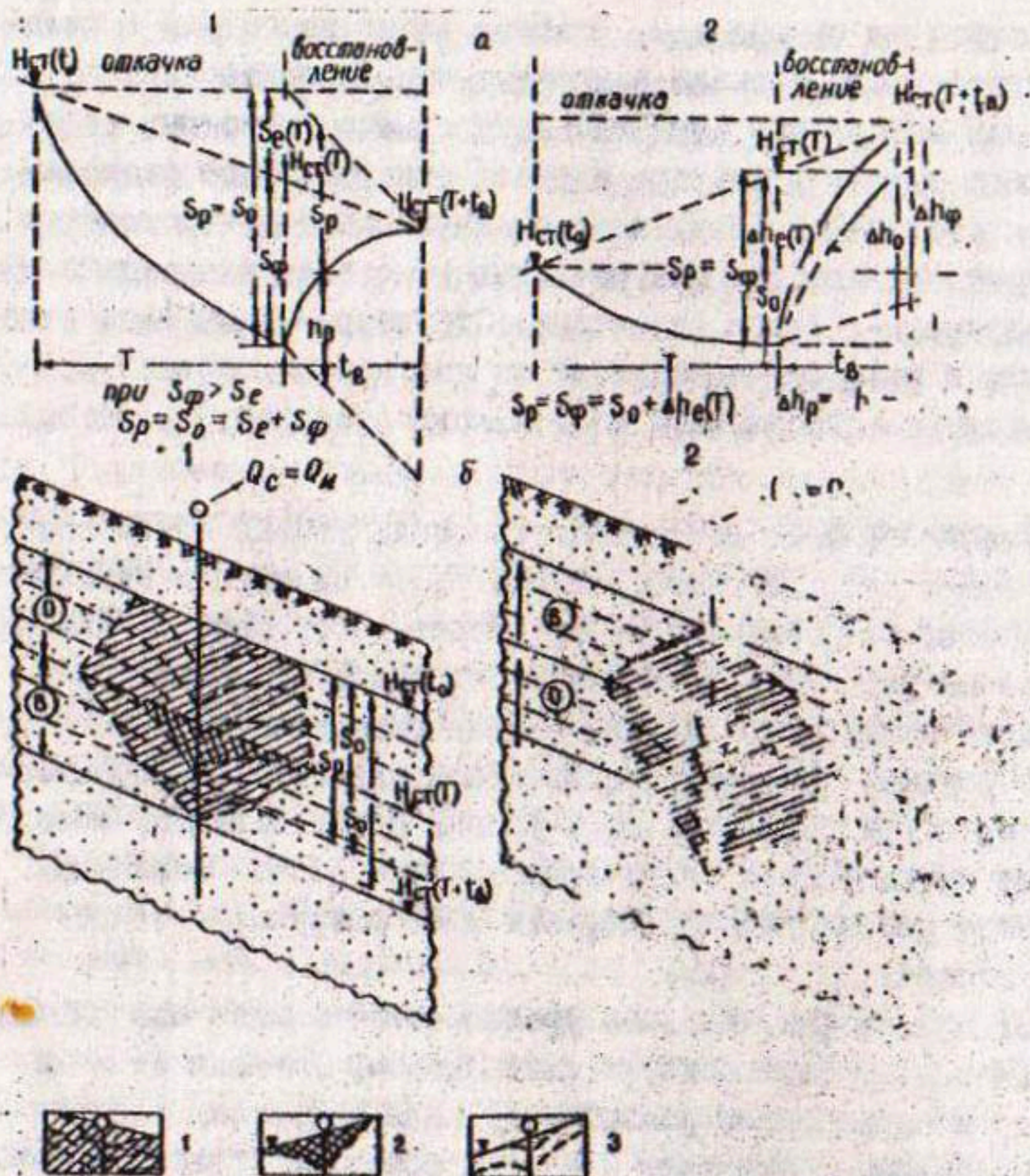


Рис. 14. Схемы к учету объема емкостных запасов, используемых откачкой, в условиях естественного подъема (2) или спада (1) уровня: а - графики хода откачки; б - схема изменения воронки депрессии в разрезе; 1 - объем емкостных запасов, участвующих в питании откачки; 2 - учитываемый расчетными зависимостями; 3 - положение воронки депрессии на различные моменты времени.

откачки зависимостям (47 и 50), учитывающим преимущественную сработку емкостных запасов и стабилизирующую роль естественного потока подземных вод; наличие информации по понижениям уровня с учетом хода естественного снижения уровня S_{ϕ} подразумевает соответствие хода снижения откачки зависимости типа (63), в которой дополнительное питание откачки за счет объема емкостных запасов, приуроченных к зоне естественного осушения за этот период, отражено в параметре B_w .

При использовании той же информации S_{ϕ} возможно соответствие ее зависимости типа (50) при условии исключения из дебита откачки части его расхода ΔQ_e , формируемого емкостными запасами зоны естественного снижения уровня:

$$\Delta Q_e = \frac{\pi R_o^2 \cdot S_o(T) \cdot \mu}{T}, \quad (64)$$

где R_o — радиус влияния откачки (остальные обозначения см. на рис. 14).

При подъеме уровня. В этих условиях ход снижения уровня подчиняется зависимости (63), отражающей условное интенсивное местное питание подземных вод в течение всего опыта, выражающееся в естественном подъеме их уровня. Использование характеристик воронки депрессии в виде S_o (понижение уровня относительно статического в начале опыта) должно показать соответствие хода снижения уровня зависимостям, имеющим меньшую величину B_w , чем полученную при анализе понижений в виде S_{ϕ} , т.е. должно отражать стремление подъема уровня к уменьшению размеров области питания откачки.

Игнорирование естественного изменения уровня при интерпретации откачек приводит к существенным ошибкам, что видно из предварительного расчета, формируемого за счет изменений этой части дебита откачки. Так, при радиусе ее влияния порядка 200 м (минимальные величины, зафиксированные в процессе опытов), интенсивности изменения уровня со скоростью 0,1–0,2 м/сут, реальных величинах водоотдачи 0,1–0,2 доля расхода откачки за счет использования емкостных запасов этой зоны может изменяться от 16,3 до 65,3 л/с, что при дебитах в 50–

100 л/с составляет от 20 до 80% расхода откачки.

Вышеизложенные предложения допустимы лишь при условии равномерной естественной скорости изменения уровня в течение всего опыта (откачка плюс полное восстановление). При неравномерной скорости изменения уровня интерпретация откачек с целью оценки параметров становится трудно осуществимой. В этом случае необходимо наличие наблюдательной скважины, расположенной за пределами ее области влияния (≈ 400 м), по которой можно установить естественный ход снижения уровня.

При выделении на графиках временного прослеживания участков резкого снижения уровней, не связанных с закономерностями, вызванными влиянием откачки, они могут быть использованы для расчета индивидуально. При этом расчетные понижения и время должны отсчитываться от достигнутых на момент перед резким снижением уровня.

ГЛАВА 5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ПРИ ОТКАЧКАХ И ТРЕБОВАНИЯ К МЕТОДИКЕ ИХ ОБРАБОТКИ

Универсальная теоретическая зависимость для описания хода снижения уровня при ОФР

Вышеприведенный анализ особенностей хода снижения уровней при откачках из пластов различного типа показывает, что основными определяющими их факторами являются: гетерогенность пласта по упругости, отражающая глубину залегания пласта; динамичность подземных вод в пласте, отражающая условия как местного и регионального питания, так и разгрузки подземных вод в зоне влияния откачки.

Выведенные зависимости (47, 50, 52, 59, 53, 63), учитывающие эти факторы, основаны на фундаментальных решениях Тейса, Хантуша, Боултона, которые проявляются на отдельных этапах откачки последовательным переходом одной функции в другую (табл. 12). Их объединяет уравнение Боултона, учитывающее изменение водоотдачи от упругой через упругопластическую в гравитационную (при последовательном рассмотрении пластов от собственно

Таблица последовательного перехода функций, определяющих
снижение уровня при откачке в пластах различного типа

Тип пласта	Характер динамичности	Этап			Зави- си- мость
		I	II	III	
Собственно напорный (схема I, а)	Бассейн	$W(u_r)$			(I)
	Поток	$W(u_r, \tau/\beta_n) \rightarrow 2K_0(\frac{\tau}{\beta_n})$			(47)
Потенциально напорный (схема I, б)	Бассейн	$W(u_y, \bar{\tau}_{yn}) \rightarrow W(u_{yn})$			(50)
	Поток	$W(u_y, \bar{\tau}_{yn}) \rightarrow W(u_{yn}, \bar{\tau}_{yn}, \tau/\beta_n) \rightarrow 2K_0(\frac{\tau}{\beta_n})$			(52)
Квазинапорный (пере- текание из смежных пластов) (схема II)	Бассейн	$W(u_y, \bar{\tau}_{yn}) \rightarrow W(u_{yn}, \bar{\tau}_{yn}, \bar{\tau}_{пер}) \rightarrow 2K_0(\bar{\tau}_{пер})$			
Собственно безнапор- ный (схема III)	Бассейн, поток, $W(u_y, \bar{\tau}_r) \rightarrow 2K_0(\bar{\tau}_r) \rightarrow W(u_r, \bar{\tau}_r) \rightarrow W(u_r)$				{59}
	Дополнительное питание	$W(u_y, \bar{\tau}_r) \rightarrow 2K_0(\bar{\tau}_r) \rightarrow W(u_r, \bar{\tau}_r, \tau/\beta_n) \rightarrow 2K_0(\frac{\tau}{\beta_n})$			{60}
					{63}

β_n, β_n - параметры, характеризующие интенсивность питания откачки: за счет естественного потока подземных вод; потока, а также местных инфильтрационных и привлекаемых ресурсов и части сложившихся запасов соответственно.

напорного до безнапорного), в котором в отличие от фундаментального решения, предусматривающего переход к зависимости Тейса для условий реальной водоотдачи, должен наблюдаться выход на зависимости Хантуша-Джейкоба, отражающие условия питания откачки.

Для всех горизонтов, за исключением собственно напорного, подчиняющегося уравнению Тейса, ход снижения уровня может быть описан зависимостью, рассчитанной П.П.Нагевичем и представленной в виде гидрогеофильтрационных палеток - серии эталонных кривых (рис. 8,9,10), описывающих весь ход снижения уровня при откачке:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W(u, u_{up}, \bar{u}_{up}, \bar{u}_n), \quad (65)$$

где $\bar{u}_{up} = \frac{r}{B_d}$; $\bar{u}_n = \frac{r}{B_n}$; B_d - параметр дренирования, характеризующий замедление проявления реальной (упругопластической или гравитационной) водоотдачи; B_n - параметр, характеризующий интенсивность питания откачки за счет различных возможных источников (естественного потока подземных вод, местного инфильтрационного питания, привлекаемых ресурсов, привлекаемой части сложившихся запасов, идущих в естественных условиях на выклинивание, испарение).

Типовые графики хода снижения уровня при откачках из различных типов пластов в виде зависимости безразмерного понижения от логарифма безразмерного времени, идентичные прослеживанию понижения от логарифма времени (график временного прослеживания), приведены на рис. 15.

Для этих графиков характерным является выделение четырех этапов, отражающих интенсивность темпа снижения уровня под влиянием откачки; I - упругий нестационарный режим; II - докнестационарный режим; III - упруго-пластический или гравитационный нестационарный режим; IV - упруго-пластический или гравитационный стационарный режим.

Более четко они проявляются при откачках в собственно безнапорных пластах, где продолжительность I этапа достигает 0,5-2 ч, II - 3-4 ч, III - до 2-3 сут. В квазнапорных и потен-

циально напорных пластах II этап не отражает своего названия и представляет переходный от I ко II этапу, в пределах которого темп снижения уровня существенно ниже, чем в сопредельных, но далек от стационарного.

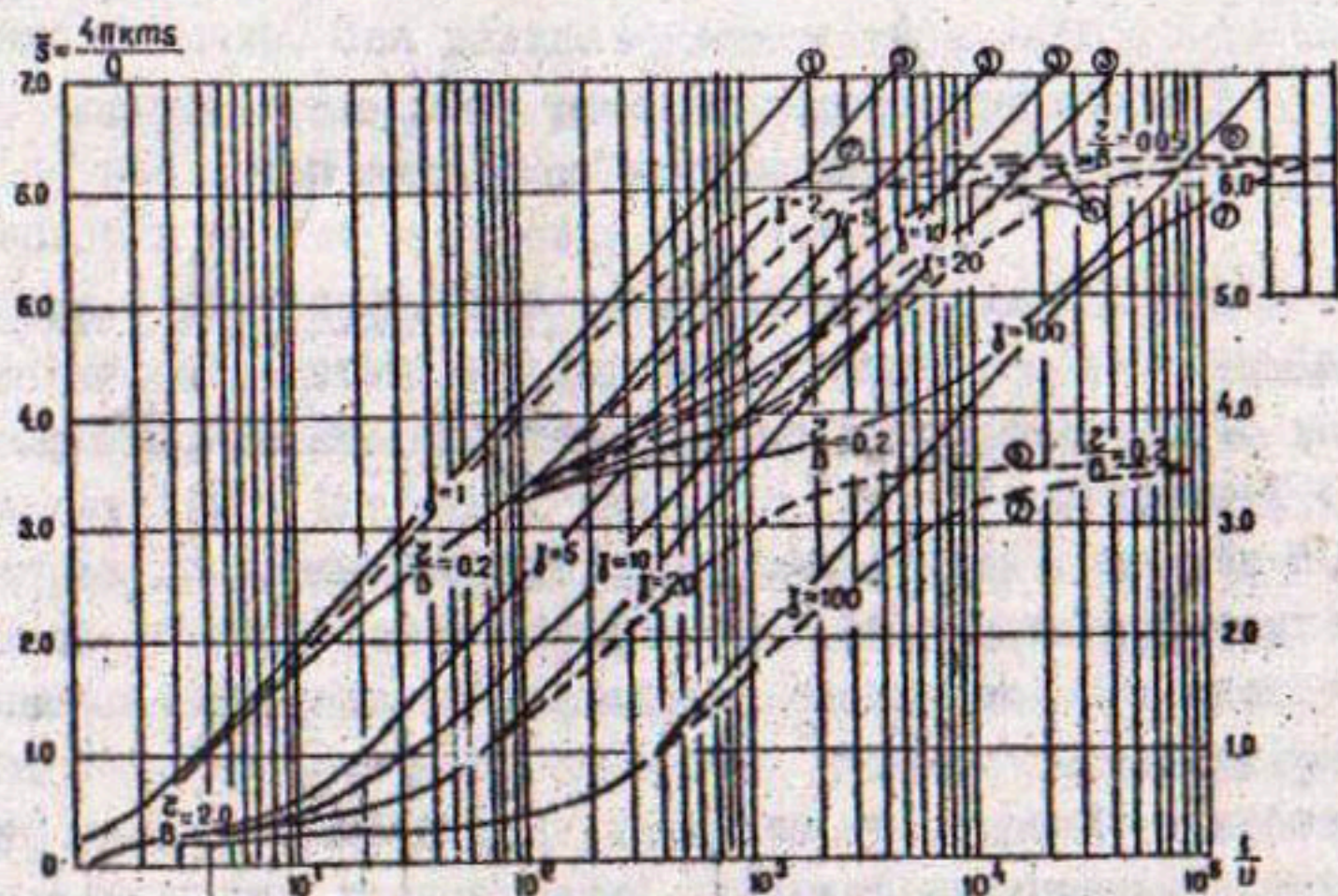


Рис. 15. Графики зависимости безразмерного понижения от логарифма безразмерного времени. 1 — гомогенный по упругости изолированный напорный пласт (собственно напорный) в условиях бассейна подземных вод; 2 — то же, в условиях потока подземных вод ($\tau/\beta = 0,05$); 3 — гетерогенный по упругости изолированный напорный пласт (потенциально напорный) при соотношениях упругоёмкости $\gamma = 2; 5; 10; 20$ для $\tau/\beta = 0,2$; 2,0 в условиях бассейна; 4 — то же, в условиях потока ($\tau/\beta = 0,05$ и $\tau/\beta = 0,2$); 5 — то же, в условиях потока ($\tau/\beta = 0,2$ и $\tau/\beta = 2,0$ при $\gamma = 20$) или квазинапорный пласт (перетекание из нижних пластов); 6 — безнапорный пласт в условиях бассейна; 7 — то же, в условиях потока или дополнительного питания.

В пределах каждого этапа ход снижения уровня отвечает зависимостям, включающим специальные функции (табл. 12), которые и должны лежать в основе методик расчета геофильтрационных параметров пласта по данным откачек. Практика таких расчетов в настоящее время ограничена, в основном, применением методов Джейкоба. Их безоговорочное использование исключало применение методов расчета для конкретных природных моделей. Час-

тично эти пробелы в методике интерпретации ОФР были устранены рекомендациями по обоснованию рационального комплекса методов оценки параметров (РКМОП), выполненными в 1989 г. (Нагевич, Саидмурадов, 1989) на примере основных МПВ Узбекистана.

Требования к рациональному комплексу методов оценки параметров по данным ОФР

Рациональный комплекс методов оценки параметров – это определенный набор логически взаимосвязанных методов расчета, позволяющих обосновать истинные геофильтрационные параметры водоносного горизонта.

РКМОП должен отвечать следующим требованиям:

максимальное отражение в математических решениях, положенных в основу того или иного метода расчета, сущности физического процесса;

логическая увязанность входящих в комплекс методов, знание критериев применимости того или иного метода в данных конкретных условиях и возможных ошибок при их применении;

минимальные затраты времени при полном решении поставленной задачи – выход на достоверные параметры пласта.

Практика расчета параметров с использованием РКМОП на ряде МПВ Узбекистана (Саидмурадов, Нагевич, 1989 г.; Чертков, Нагевич, 1993 г.) показала, что комплексный подход позволяет (при наличии оптимальной информации) выйти на достоверные параметры пласта при стабильности их значений по всем пьезометрам, установить на графиках временного прослеживания участки, отвечающие или близкие зависимости Тейса, расчеты по которым методами Джейкоба дают параметры, близкие к достоверным.

Выполненные исследования позволили раскрыть общие закономерности формирования воронки депрессии во времени и структуры составляющих дебита откачки. Они отражены в ряде частных решений, обобщенных для всех типов пластов универсальной зависимостью (65). Составленная на ее основе серия гидрогеофильтрационных палеток дает возможность анализировать весь ход откачки и получить характеристики параметров и питания откачки

в пределах ее влияния. Необходимость включения этих проработок в РКДП не вызывает сомнения.

Интерпретация результатов ОФР не должна ограничиваться только анализом зафиксированных в скважинах понижений уровня и расхода откачки. Она должна производиться задолго до начала опыта и представлять собой комплекс целенаправленных мероприятий, конечной целью которых является получение фильтрационных характеристик пласта и условий его питания.

На предполевой стадии исследований необходимо предварительное обоснование типа водоносного горизонта (в зависимости от типа МПВ), оптимальной конструкции опытной скважины и куста наблюдательных (глубина, положение фильтров, расстояние пьезометров до опытной), дебита скважины (для обеспечения приемлемых срезов уровней), учета возможных граничных условий, продолжительности опыта, включая и восстановление (в зависимости от типа водоносного горизонта, ожидаемого характера снижения уровня в ходе откачки и восстановления). Предварительные расчеты для выбора необходимых показателей откачки могут быть выполнены на основе косвенных признаков (литолого-фациальный состав водовмещающих отложений, положение пласта относительно поверхности земли). Обязательным является включение в схему куста одного пьезометра, располагающегося за пределами зоны влияния откачки.

На полевой стадии исследований корректируются конструктивные особенности опытного куста скважин по результатам бурения (гидрогеологическая документация бурения, каротаж скважин) для установления литологического состава и предварительной водопроницаемости вскрытых отложений;

выясняются граничные и начальные условия пласта в пределах возможной области влияния откачки по данным специализированного маршрутного гидрогеологического обследования площади в радиусе 300-400 м от опытной скважины. В процессе обследования выясняются и картируются границы литолого-фациальных зон и разновозрастных отложений, поверхностные водотоки, дренаи, зоны выклинивания, орошаемые территории, площади развития влаголюбивой растительности. По его результатам устанавливается роль

тех или иных проявлений подземных вод, водотоков на ход откачки, и на ее основе – необходимость наблюдений за характером изменения граничных условий в процессе опыта и корректировки количества и положения наблюдательных скважин с учетом выявленных гидрогеологических особенностей опытного участка. Все пункты наблюдений (скважины, речные и водомерные посты) должны иметь плановую и высотную привязки, инструментально необходимо зафиксировать и плановое положение всех водопроявлений и путей их миграции. Обследование особенно обязательно для собственно и потенциально безнапорных пластов, характеризующихся сложностью структуры формирования дебита откачки;

грамотное проведение и документация самого опыта в рамках общепринятых требований, включая фиксирование и всех необходимых, дополнительных показателей (дебит откачки; положение уровней по скважинам, речным постам; расходы основных водопроявлений; температурный режим откачиваемой воды, в пьезометрах, водопроявлений; качественный состав воды по тем же пунктам наблюдений; изменение количественных характеристик водопроявлений и поверхностных водотоков; время выпадения атмосферных осадков в виде дождя и снега; период интенсивного таяния снежного покрова; периоды подачи воды по оросителям на орошаемые площади).

Изложенное требует внимательного и творческого отношения гидрогеолога к проведению опыта, обеспечивающего получение перечисленной информации в процессе периодических (ежедневных) обследований участка и детального анализа хода откачки по графикам временного и площадного прослеживания. Это позволит откорректировать продолжительность откачки и восстановления.

На стадии камеральной обработки интерпретируются результаты опыта с использованием рационального комплекса методов, успешность применения которого обусловлена полнотой информации, полученной на предыдущих стадиях исследований. Алгоритм рационального комплекса методов оценки параметров, который может быть положен и в основу компьютеризации расчетов геофильтрационных параметров, подобной программе "Гидпар" (Дульките,

1982), должен предусматривать:

1. Установление типа водоносного горизонта:

по ряду косвенных признаков (глубина залегания пласта, возраст и генезис водовмещающих отложений, величина напора подземных вод над кровлей пласта, удаленность участка от области питания (табл. 6),

по анализу графика временного прослеживания, на котором ход снижения уровня подчиняется характерным для конкретного пласта зависимостям, что при сравнении с графиками (рис. 12) позволяет установить тип водоносного горизонта.

2. Предварительную оценку геофильтрационных характеристик опробуемого пласта:

водопроницаемости — по удельному дебиту опытной скважины, используя известные зависимости $k_m = 100 \cdot Q$ (безнапорный пласт) и $k_m = 150 \cdot Q$ (собственно, потенциально и квазинапорные пласты);

водостдачи — по зависимости (31) с учетом напора над кровлей пласта;

пьезопроницаемости — через связь водопроницаемости и водостдачи.

На основе анализа граничных условий и типа пластов следует установить достоверность параметра водопроницаемости, который должен быть близок к реальным для напорных и квазинапорных пластов и существенно отличаться в сторону завышения для безнапорных пластов, особенно при наличии питающих границ.

3. Расчет параметров методом временного прослеживания в пределах I и III этапов по всем пьезометрам. Возможные варианты положения прямых для различных типов пластов, проведенные через точки зависимости, и сопоставление полученных расчетных величин параметров с точки зрения отличия их от достоверных, приведены на рис. 16–20. Однозначность рассчитанных параметров по всем пьезометрам должна наблюдаться только при опробовании напорных пластов, а для остальных типов наименьшие значения водопроницаемости, близкие к достоверным, должны быть получены только по ближайшим пьезометрам. Относительная ошибка в его определении по остальным скважинам (завышение в не-

сколько раз) обусловлена интенсивностью питания пласта в период откачки (естественный поток, перетекание, влияние питающих границ и т.д.), уменьшающей темп снижения уровня и, соответственно, расчетный угловой коэффициент прямой.

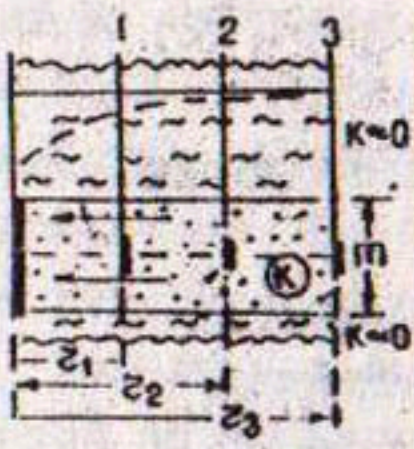
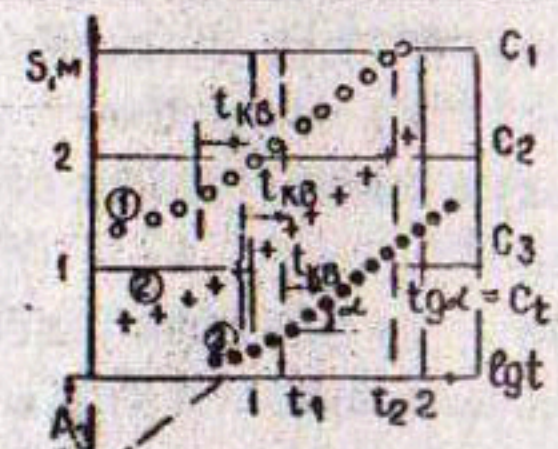
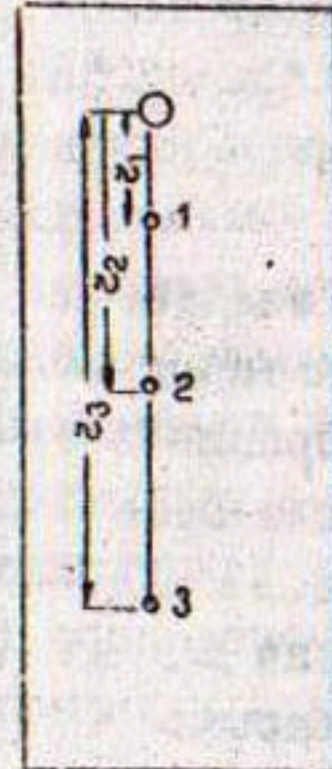
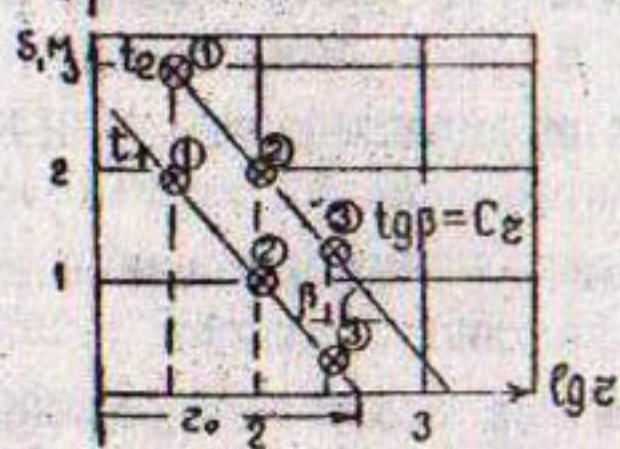
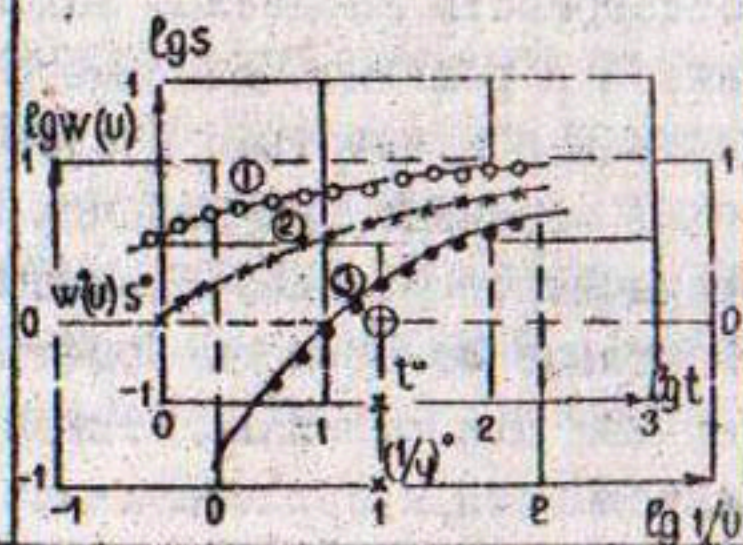
Характерный разрез и расположение наблюд. скв.-ны	Методы расчета и координаты	Типовые графики прослеживания	Результаты расчета
	временное прослеживание ($s - \lg t$)		$C_1 = C_2 = C_3 = C_t$ $km_1 = km_2 = km_3 = km_t$ $a_1 = a_2 = a_3 = a_t$
	площадное прослеживание ($s - \lg z$)		$C_z = 2C_t$ $km_z = km_t$ $a_z = a_t$
	эталонная кривая Тейса ($\lg s - \lg t$)		$km_T = km_t = km_z$ $a_T = a_t = a_z$

Рис. 16. Типовые аналитические графики при оценке параметров рациональным комплексом методов (схема 1а - собственно напорный водоносный пласт).

4. Расчет параметров методами, учитывающими интенсивное питание пласта в период откачки за счет явных и неявных граничных условий.

Метод гидрогеофильтрационных палеток П.П.Нагевича, отражающих весь ход снижения уровня в процессе откачки из водоносных горизонтов любого типа (рис. 6, 9, 10). Совмещение точек

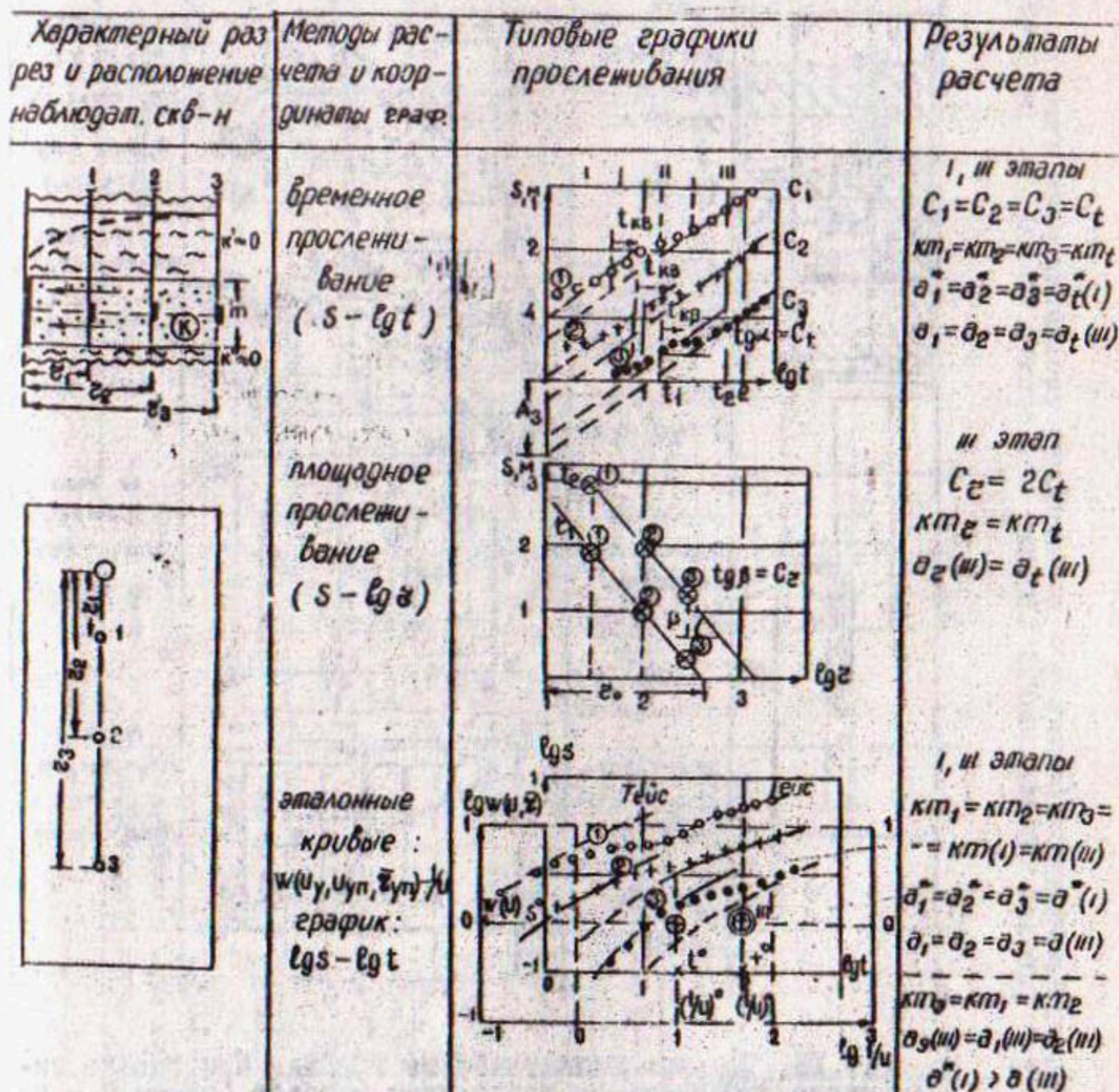


Рис. 17. Типовые аналитические графики при оценке параметров рациональным комплексом методов (схема 1б - потенциально-напорный водоносный пласт).

зависимости фактического графика, построенного в координатах $\lg S - \lg t$ в масштабе графиков эталонных кривых, позволяет выбрать кривую, полностью отвечающую фактической. Сняв координаты

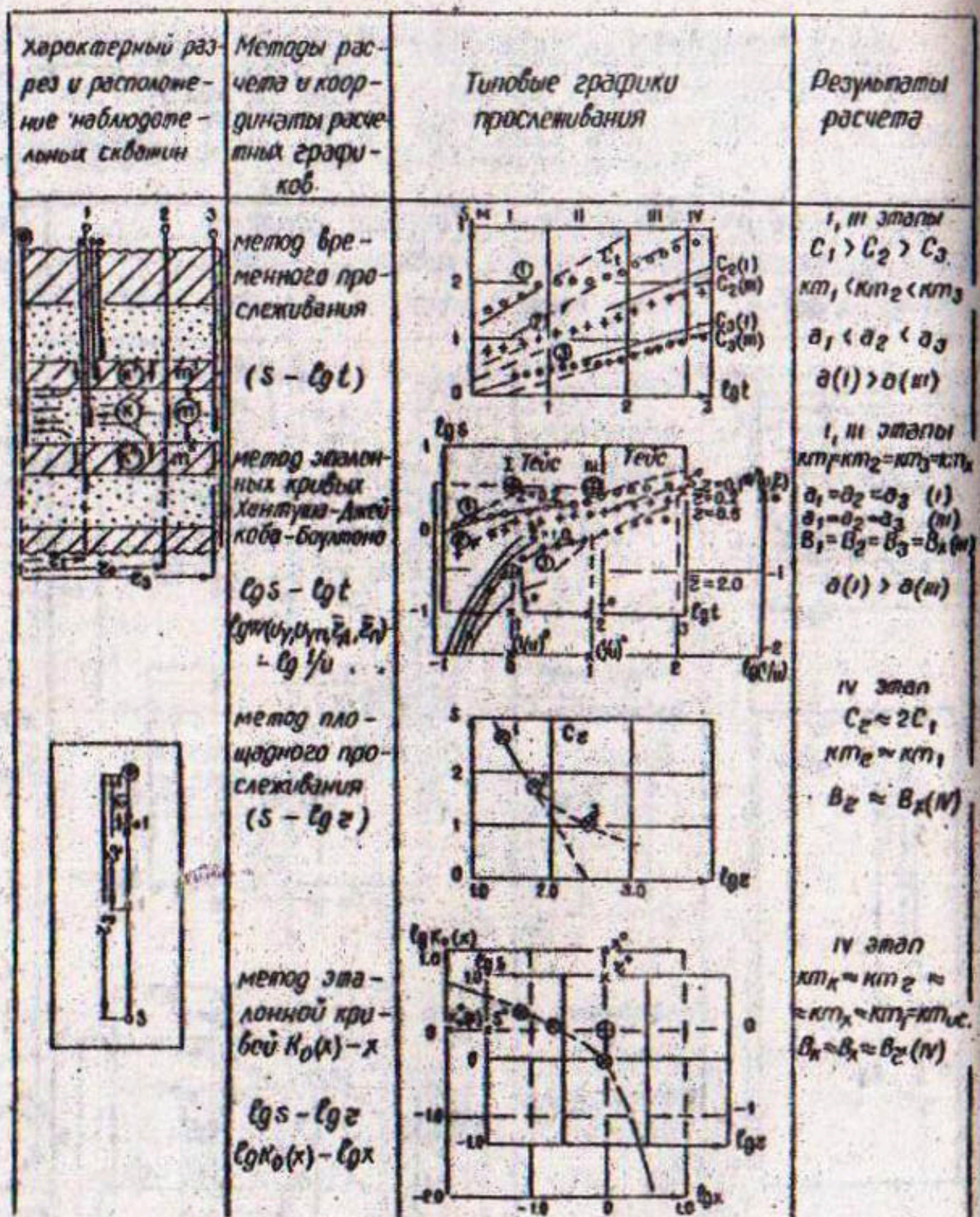


Рис. 18. Типовые аналитические графики при оценке параметров рациональным комплексом методов (схема II – потенциально напорный и квазинапорный водоносный пласт с перетеканием через разделяющие слои).

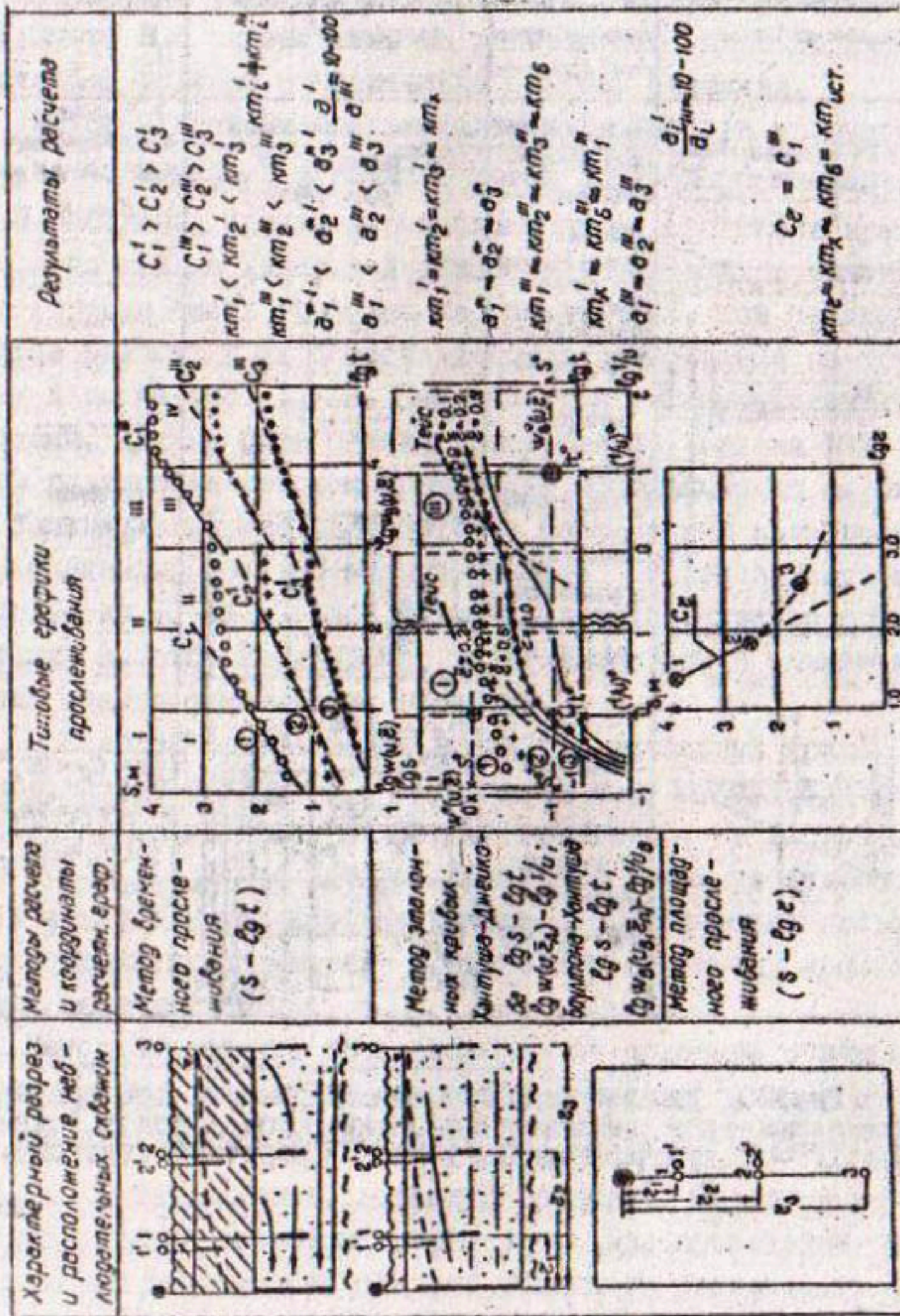


Рис. 19. Типовые аналитические графики при оценке параметров рациональным комплексом методов (схема III - безнапорный неограниченный пласт).

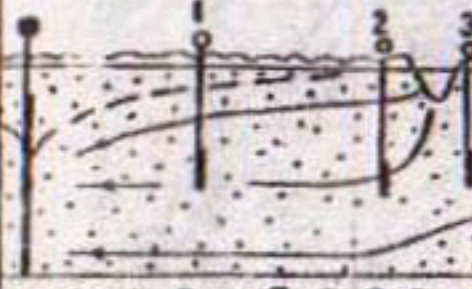
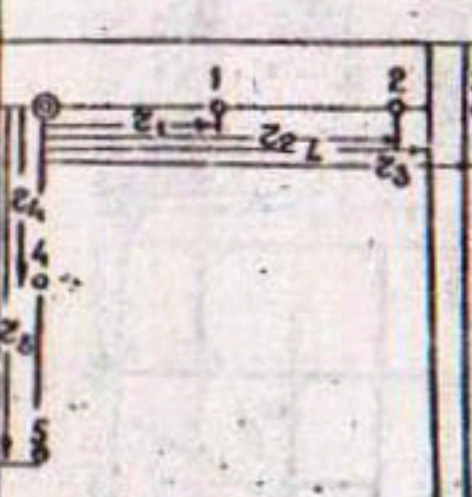
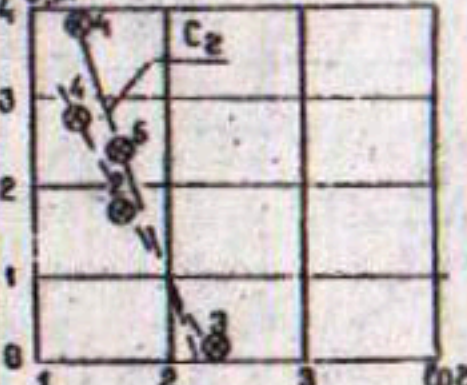
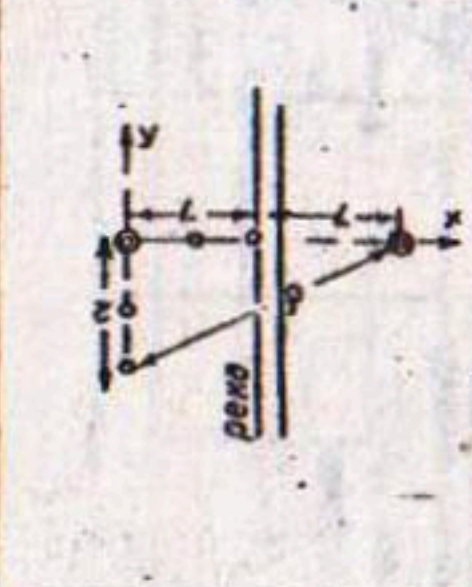
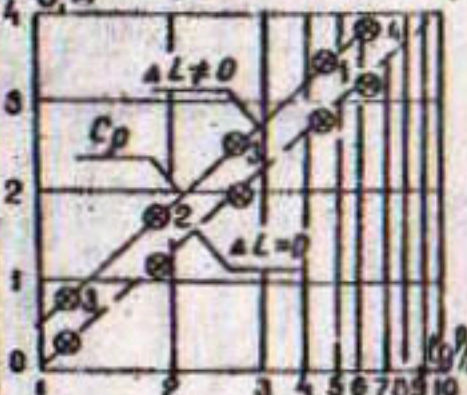
Характерный разрез и расположение наблюдательных скважин	Методы расчета и координаты расчетных графиков	Типовые графики прослеживания	Результаты расчета
	метод временного прослеживания ($S - \lg t$) метод эталонных кривых: Хантуша-Акейкова $C_D S - \lg t$, $C_D W(u, z) - C_D 1/u$	график аналогичен приведенному на рис. 19	I, III этапы аналогичные для схемы III рис. 19.
	Бойлтона $C_D S - \lg t$, $C_D W(u, z) - C_D 1/u$, $C_D W(u, z) - C_D 1/u$ Метод плоского прослеживания ($S - C_D e$)		IV этап $C_2 \approx 2C_1^{III}$
	метод плоского прослеживания (с учетом границы) ($S - C_D R/z$)		$C_D \approx C_2 \approx 2C_1^{III}$ $kt_c \approx kt_x \approx kt_b \approx kt_p \approx kt_{ист.}$

Рис. 20. Типовые аналитические графики при оценке параметров рациональным комплексом методов (схема IV - полуограниченный пласт, приречный участок).

ты расчетной точки, отражающей положение кривых в пределах III и IV этапов, можно получить реальные геофильтрационные параметры пласта (Km, q, M) и характеристику его питания через параметр B_{Π} , указывающий на удаленность условной или явной питающей границы относительно опытной скважины.

Метод эталонных кривых Хантуша-Джейкоба в общеизвестном виде на I, II этапах откачки и метод Боултона с дополнениями П.П.Налевица, предусматривающими выход эталонных кривых Боултона на кривые Хантуша-Джейкоба для условий реальной водоотдачи (правая часть графиков на рис. 9, 10). Ход анализа результатов расчета и их сопоставление с полученными по другим методам даны на рис. 17-19. Значения Km , рассчитанные тремя методами, должны быть близки (расхождение порядка 10%) и меньше, чем полученные методом временного прослеживания по ближайшим к опытной скважине пьезометрам. Коэффициент пьезопроводности, рассчитанный по I, II этапам, должен быть выше полученного при обработке III, IV этапов, который отражает здесь реальную водоотдачу пласта. Расхождения могут достигать в зависимости от типа пласта одного-двух порядков.

Проверкой правильности выбранных эталонных кривых являются: определение функции $K_0(\bar{t}_{\Pi})$ для каждого пьезометра по характеристикам совмещенных эталонных кривых $\bar{t}_{\Pi}$ и построение графика $Si - K_0(\bar{t}_{\Pi})$, на котором положение точек зависимости на прямой линии с выходом ее на начало координат свидетельствует о достоверности совмещения; и позволяет по уклону прямой подтвердить величину Km .

Метод площадного прослеживания по конечным понижениям предусматривает анализ графиков в координатах $S - \lg r$ (при отсутствии или наличии неявно питающей границы) или $S - \lg \frac{r}{r_0}$ (при явной, установленной, питающей границе). Он применяется для подтверждения расчетных параметров. При проведении прямой через точки зависимости следует учитывать удаленность пьезометров от центральной скважины, характеристику $\bar{t}_{\Pi}$, полученную в процессе обработки методом эталонных кривых. В обоснование прямой должны быть положены точки зависимости по ближайшим пьезометрам, на которых $\bar{t}_{\Pi} < 0,3$ (рис. 16-20).

5. Выяснение питания откачки или структуры источников формирования ее дебита предусматривает анализ параметра питания B_n , полученного по результатам расчета, и его расчленения на составляющие, которые отражают явные, установленные, источники питания, например, за счет естественного потока подземных вод β_n , реки B_p , перетекания B , и неявные, логически предполагаемые (сокращение испарения, выклинивание, местная инфильтрация). Такая расшифровка позволит выйти на объективно обоснованные расчетные схемы и аналитические зависимости, обеспечивающие высокую оправдываемость рассчитанных эксплуатационных запасов подземных вод. Применение рационального комплекса методов оценки параметров при изложенном подходе гарантирует получение реальных геофильтрационных параметров пласта.

Последовательность применения методов и анализа результатов для различных типов пласта отражена на рис. 16-20. Представленные на них графики наиболее часто проявляются:

схемы I, а, I, б (рис. 16, 17) - в МПВ артезианских бассейнов, в строении которых участвуют водоносные пласты, приуроченные к отложениям мела и палеогена;

схема II (рис. 18) - в МПВ погребенных речных долин, периферической части конусов выноса, предгорного шлейфа, развитых в плиоцен-четвертичных отложениях;

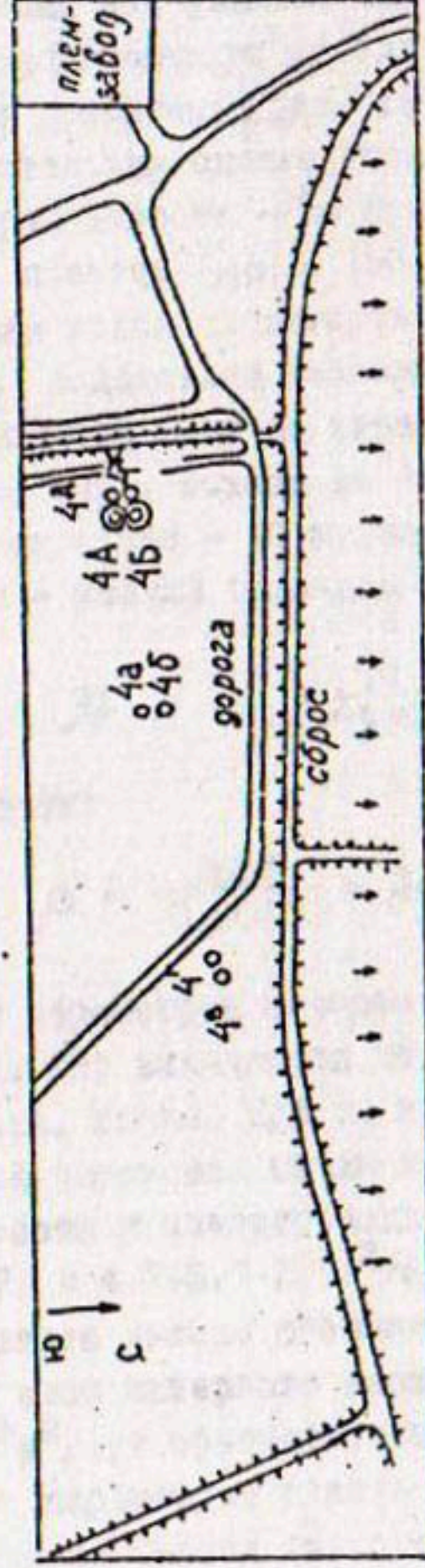
схемы III, IV (рис. 19, 20) - в МПВ речных долин, головной части конусов выноса, линз пресных подземных вод.

Примеры расчета параметров по данным ОФР

Примеры применения РКМОП приведены для квазинапорного и безнапорного пластов.

Квазинапорный пласт. По кусту 4 на участке "Крестьянский" в Голодной степи производится опробование водоносных пластов галечников средне- и нижнечетвертичного возраста, залегающих в интервалах глубин от 100 до 200 м. Пласты отделены от вышележащих горизонтов мощным слоем слабопроницаемых суглинков, а от нижележащих - еще менее проницаемыми слоями алевролитов (рис. 21). Опробуемый пласт представлен серией слоев различ-

а



б

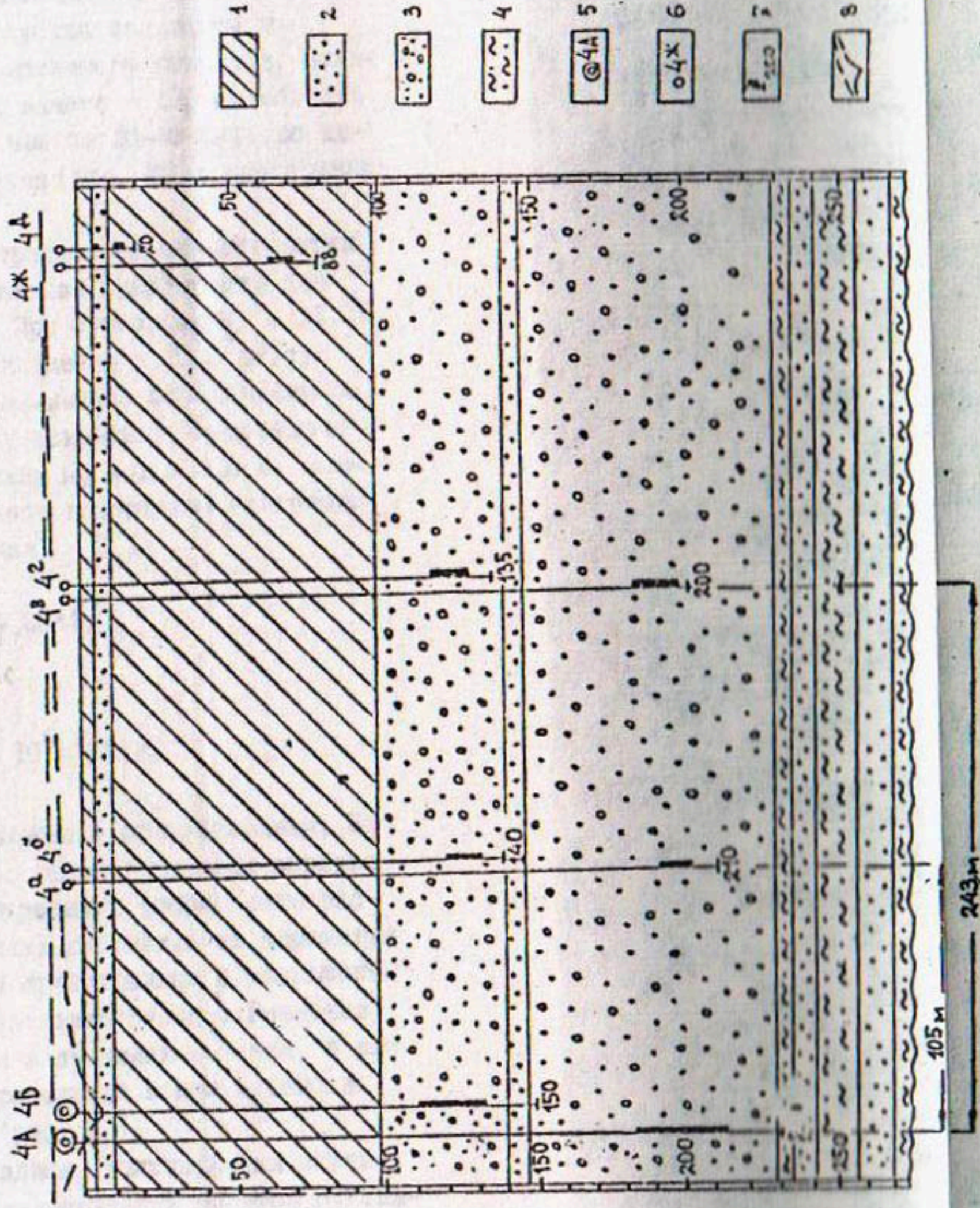


Рис. 21. Схема расположения (а), литологический разрез и конструкция скважины (б) опытного куста № 4 (участок "Крестынский", Голодная степь; данные И.И. Цуха). 1 - суглинок; 2 - песок; 3 - галечник, заполнитель - песок; 4 - алевролит. Скважины: 5 - опытно-эксплуатационная, 6 - наблюдательная; 7 - положение фильтра, цифра внизу - глубина скважины; 8 - положение УИВ и депрессионной воронки.

ной проницаемости, мощность каждого из которых, по данным электрокаротажа, не превышает 10 м.

1. Тип водоносного горизонта – квазинапорный пласт – установлен по ряду косвенных признаков (глубина залегания до 200 м; водовмещающие отложения – четвертичного возраста, аллювиального генезиса; напор над кровлей пласта – 100 м; область питания подземных вод удалена более, чем на 30–40 км); по характеру графика временного прослеживания (рис. 22) и его сравнению с типовыми графиками (рис. 15).

2. Предварительная оценка геофильтрационных характеристик пласта: водопроводимости – по приближенной зависимости для квазинапорных пластов ($\kappa m = 150 q$). При суммарном $q = 11,08$ л/с минимальная водопроводимость оценивается в $1659 \text{ м}^2/\text{сут}$ (q уменьшен вследствие незнания понижения, обусловленного несовершенством скважины по характеру вскрытия); водоотдачи – по зависимости (31), исходя из величины $H_k + m = 230$ м, мощности отдельных слоев – 10 м, начальной водоотдачи (литологический состав – мелкий галечник-речник) – 0,1:

$$\mu = 0,1 \cdot \frac{10}{230} = 0,0043;$$

пъезопроводности:

$$\alpha = \frac{1659}{0,0043} = 3,8 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

3. Расчет параметров методом временного прослеживания. На графике (рис. 22) выделяются четыре, характерных для квазинапорного пласта, этапа. При их игнорировании (осреднение расчетной прямой через все точки графика) рассчитанные параметры водопроводимости и пьезопроводности представляются завышенными (2583–2677 и $4,7\text{--}5,7 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$ соответственно). Реальные параметры пласта должны появляться в пределах III этапа, и рассчитанные в этом интервале параметры близки к ним – 1893 и $5,0\text{--}5,38 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$ соответственно (рис. 22).

4. Расчет параметров пласта методами, учитывающими интенсивность питания (метод гидрогеофильтрационных палеток П.П.Нагевича). Фактический график прослеживания в координатах $\lg S$ –

График прослеживания $s-lgt$
Групповая откачка из куста № 4

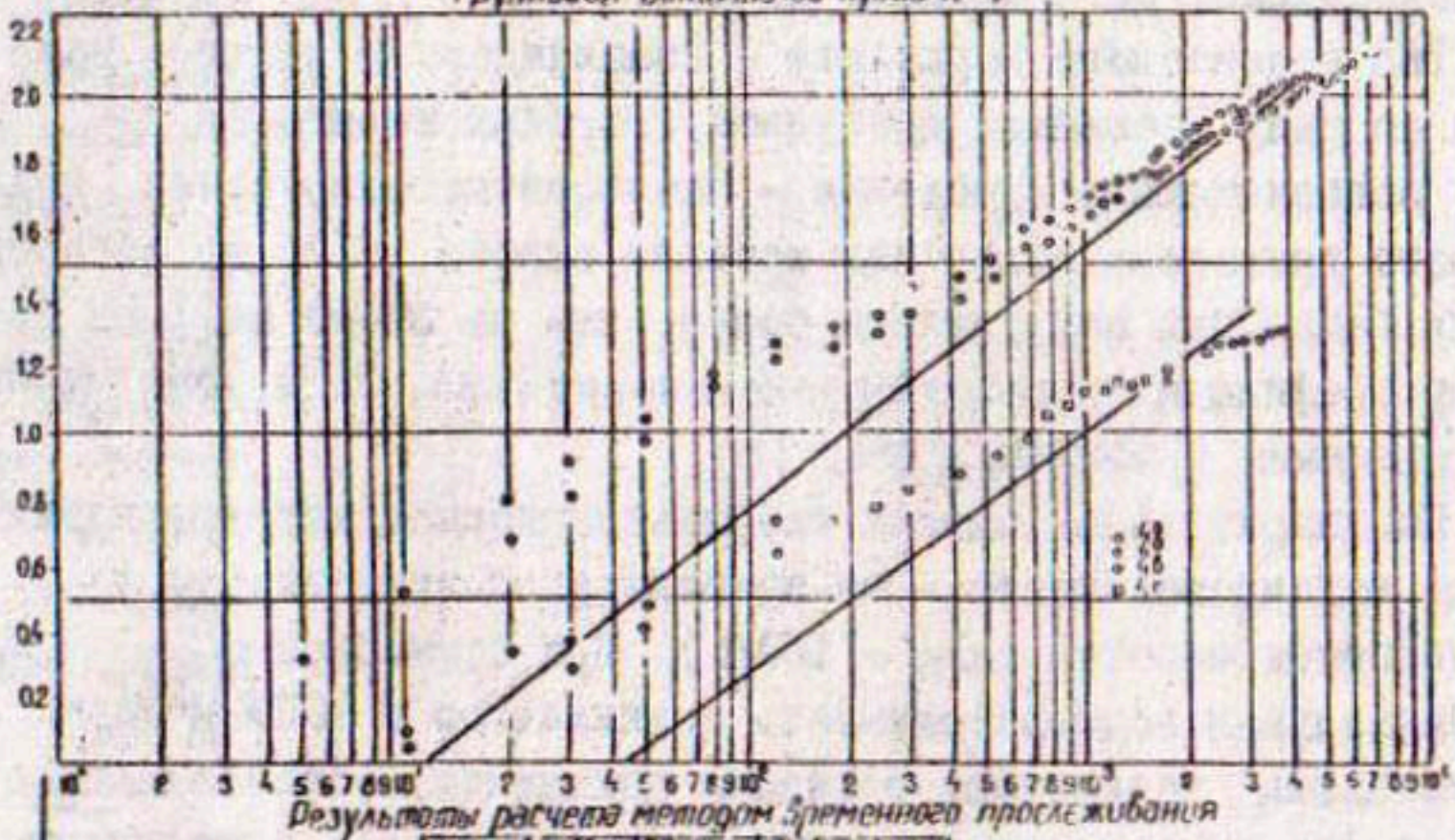


График прослеживания $lg s - lgt$
Групповая откачка куста № 4

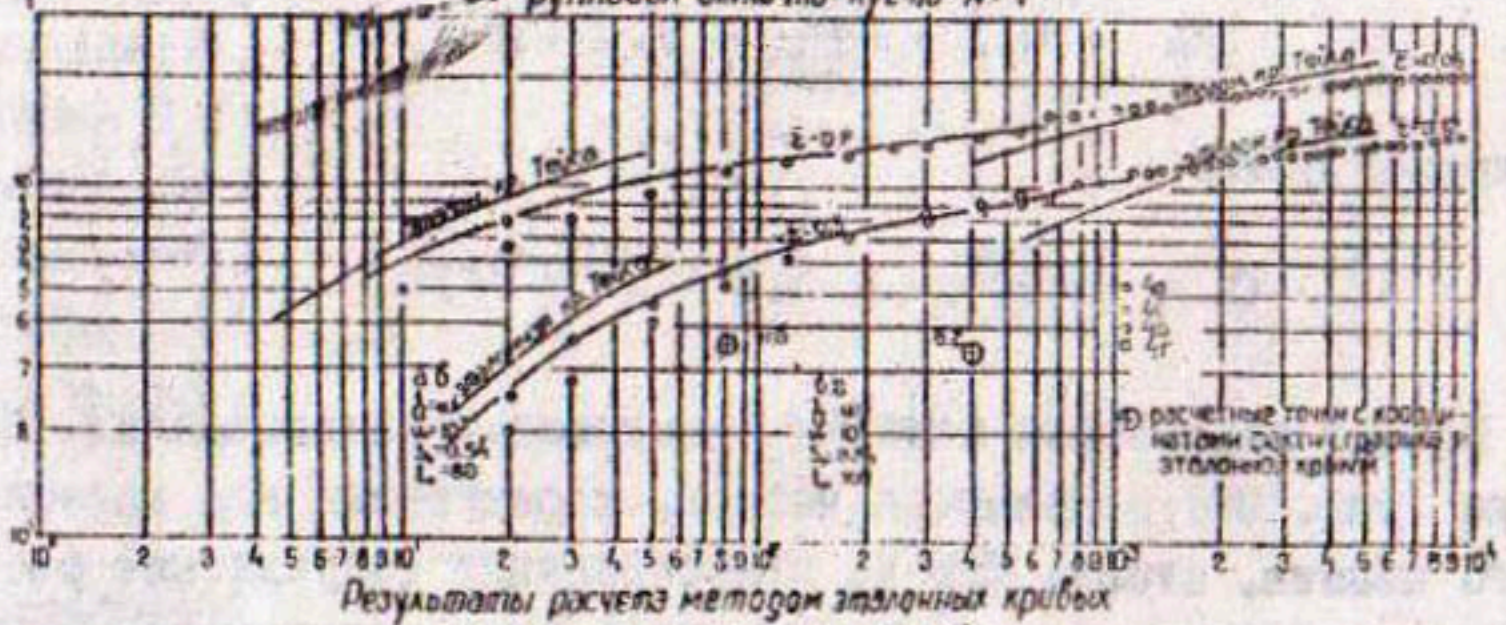


Рис. 22. Графики прослеживания и результаты расчета параметров опытного куста № 4 (участок "Крестьянский", Голодная степь).

$-\lg t$ совмещается сначала с графиком эталонных кривых (рис. 8). Цель этого совмещения — установление соотношения реальной и упругой водоотдач пласта (γ). Для данного примера оно составляет примерно 10, что позволяет непосредственно для определения параметров пласта использовать гидрогеофильтрационные палетки (рис. 9), отражающие характер снижения уровня при аналогичном соотношении водоотдач. Фактические графики снижения для ближайших скважин (рис. 22) хорошо совпадают в начальной части графиков с характеристиками эталонных кривых $\bar{\gamma} = 0,2$, а в конечной с $\bar{\gamma} = 0,05$. Для дальних скважин аналогично изменяются характеристики эталонных кривых с $\bar{\gamma} = 0,4$ до $\bar{\gamma} = 0,12$. Рассчитанные значения параметров водопроводимости ($1800 \text{ м}^3/\text{сут}$), пьезопроводности ($5 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$), интенсивности питания (2000 м) представляются реальными (табл. 13).

5. Расшифровка структуры питания откачки или источников формирования ее дебита. Возможные источники питания — естественный поток подземных вод и перетекание из нижележащих пластов. Полученный по расчету параметр интенсивности питания $B_n = 2000 \text{ м}$ должен отражать эти составляющие (зависимость 53). Оцениваем величину β_n , используя зависимости (40 и 45), полученные параметры пласта и величину уклона потока $i = 0,0025$ (по картам гидроизопьез):

$$X_0 = \frac{7724}{2 \cdot 3,14 \cdot 1890 \cdot 0,0025} = 259 \text{ м},$$

$$\beta_n = 259 \cdot 12,92 = 3350 \text{ м}.$$

Из зависимости (53) определяем $B_{\text{пер}} = 2450 \text{ м}$.

Исходя из природной ситуации (снижение напора опробуемого пласта не вызвало нисходящей фильтрации через разделяющий слой из верхнего пласта) перетекание определяется притоком через разделяющий слой из нижних пластов. Фильтрационные характеристики этого слоя могут быть получены из зависимости для $B_{\text{пер}}$ (3):

$$K_p = \frac{1890 \cdot 7}{2450^2} = 0,0022 \text{ м/сут}.$$

Соотношение составляющих питания откачки за счет потока (Q_n)

Т а б л и ц а 13

Сводная таблица
результатов расчета параметров по кусту 4А, 4Б

Номер сква- жины	Метод									
	Временное прослеживание		Хантуша (схема П), ша (квазипорный)		Боултона-Ханту- ша (квазипорный)		Q , л/с	$kп$, $\frac{м^2}{сут}$	μ , по (31)	α , $\frac{м^2}{сут}$
	$kп$, $\frac{м^2}{сут}$	α , $\frac{м^2}{сут}$	$kп$, $\frac{м^2}{сут}$	μ	$kп$, $\frac{м^2}{сут}$	μ				
4А а,б	2583	$5,7 \cdot 10^6$	0,0045	2673	$4,7 \cdot 10^6$	0,0056	2430	0,002		
4Б в,г										
Схема П (напорный с перетеканием)										
4А а,б		$5,38 \cdot 10^5$			$4,9 \cdot 10^5$		2025	0,0020	3,23	
	1896		0,0035	1800		0,0036				1690
4Б в,г		$5,0 \cdot 10^5$			$5,3 \cdot 10^5$		2040	0,0022	7,8	
										1690
										0,0043
										$3,93 \cdot 10^5$

и перетекания ($Q_{пер}$) определяется по зависимости:

$$\frac{Q_n}{Q_{пер}} = \frac{K_0 \left(\frac{r}{r_{пер}} \right)}{K_0 \left(\frac{r}{r_n} \right)} \approx 0,9; \quad Q_n = 0,9 Q_{пер};$$

$$Q_0 = Q_n + Q_{пер} = 1,9 Q_{пер};$$

$$Q_{пер} = 0,527 \cdot Q_0;$$

$$Q_n = 0,473 \cdot Q_0.$$

При суммарном расходе 89,4 л/с отбирается за счет потока - 42,3 или 67,9 л/с с учетом самоизлива, за счет перетекания снизу - 47,1 л/с.

Безнапорный пласт. Откачка проводилась из куста скважин Ir (участок "Алмазар", МПВ долины р. Чирчик) и опробовала водоносный горизонт аллювиальных галечников. Куст расположен между двумя протоками реки. Полная информация об откачке, конструкциях скважин и их расположении приведена на рис. 23.

1. Тип водоносного горизонта (безнапорный) не требует дополнительного обоснования и подтверждается характером графика временного прослеживания (рис. 23) - наличие четырех этапов снижения уровня.

2. Предварительная оценка геофильтрационных параметров пласта: водопроводимости - по приближенной зависимости для безнапорных пластов ($K_{ф} = 100q$), в которой с учетом влияния реки эмпирический коэффициент связи может быть уменьшен до 70-80. При $q = 16,18$ л/с водопроводимость предварительно оценена в 1132-1294,4 м²/сут; водоотдачи - по литологическому составу водосодержащих пород - $\mu = 0,1-0,2$; пьезопроводности - $5 \cdot 10^3 - 1,2 \cdot 10^4$ м²/сут.

3. Расчет параметров методом временного прослеживания по уловним прямым, проведенным по наиболее крутой части в пределах I и III этапов (рис. 24). Полученные параметры существенно различаются - $K_{ф}$ от 1798 до 5641 м²/сут, $q = 3,9 - 5 \cdot 10^5$ м²/сут (I этап), $1-3,5 \cdot 10^4$ м²/сут (III этап). Завышение значения за счет влияния реки. Минимальные величины водопроводимости ($K_{ф} = 1798$ м²/сут) и пьезопроводности ($q = 1 \cdot 10^4$ м²/сут) могут быть взяты за ориентир в качестве их

конструкция кустов скважин

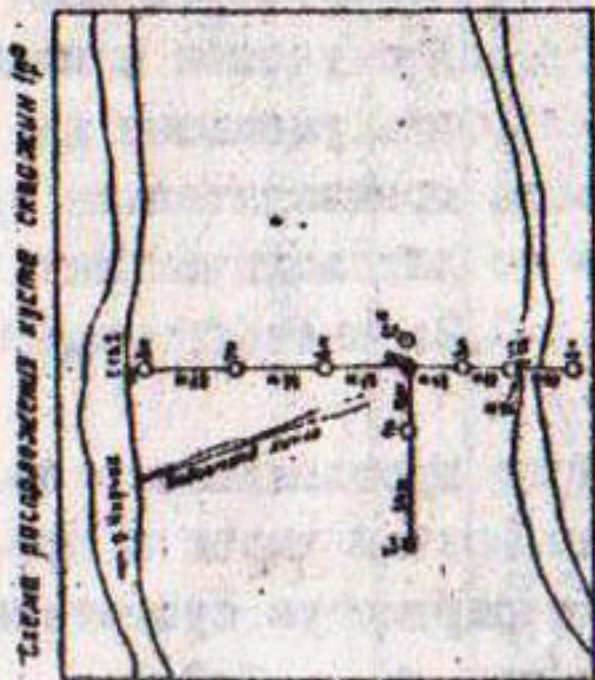
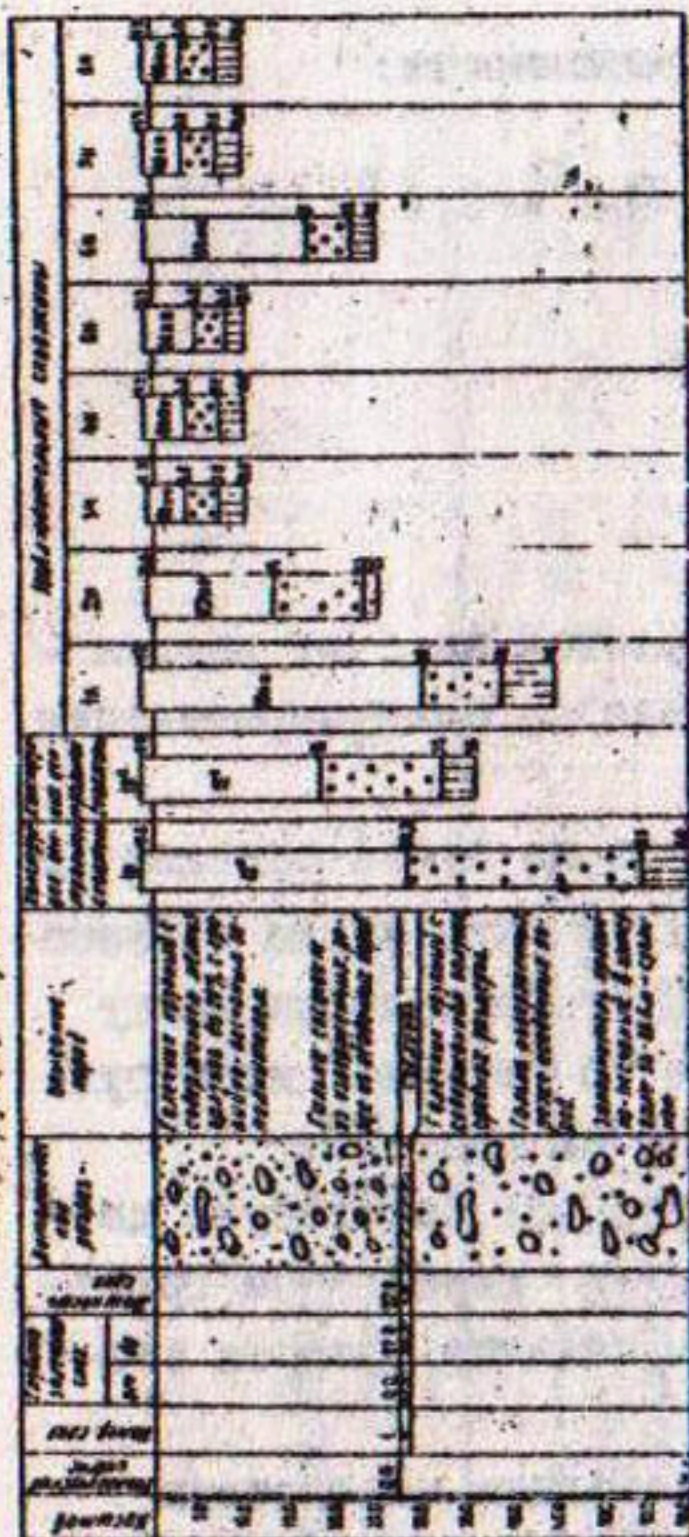


ГРАФИК ПРОСЛЕЖИВАНИЯ 5-47

ГРАФИК ПРОСЛЕЖИВАНИЯ 5-48 (Р)

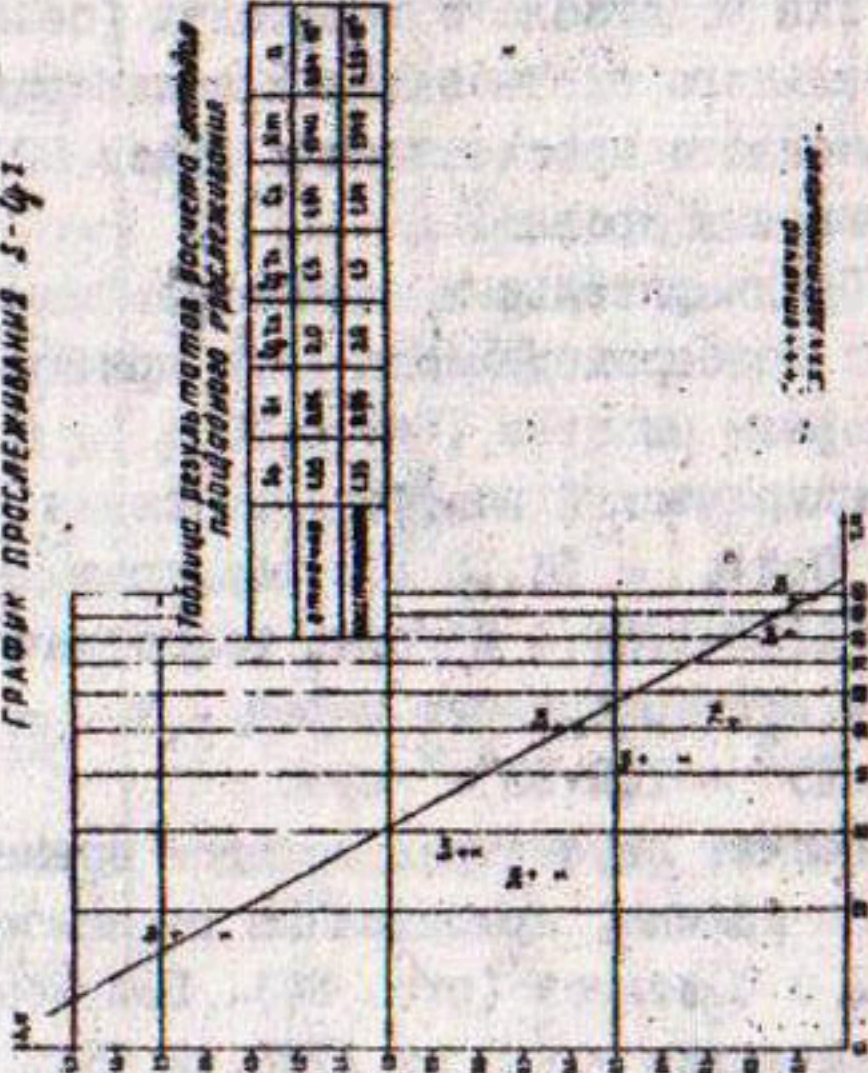


Таблица результатов расчета площади

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Площадь	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65
Расстояние	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65

Глубина скважины

Глубина скважины

Рис. 23. Схема расположения, конструкция кустов и графики площадного прослеживания скв. 1Р (участок Алмазар, долина р. Чирчик).

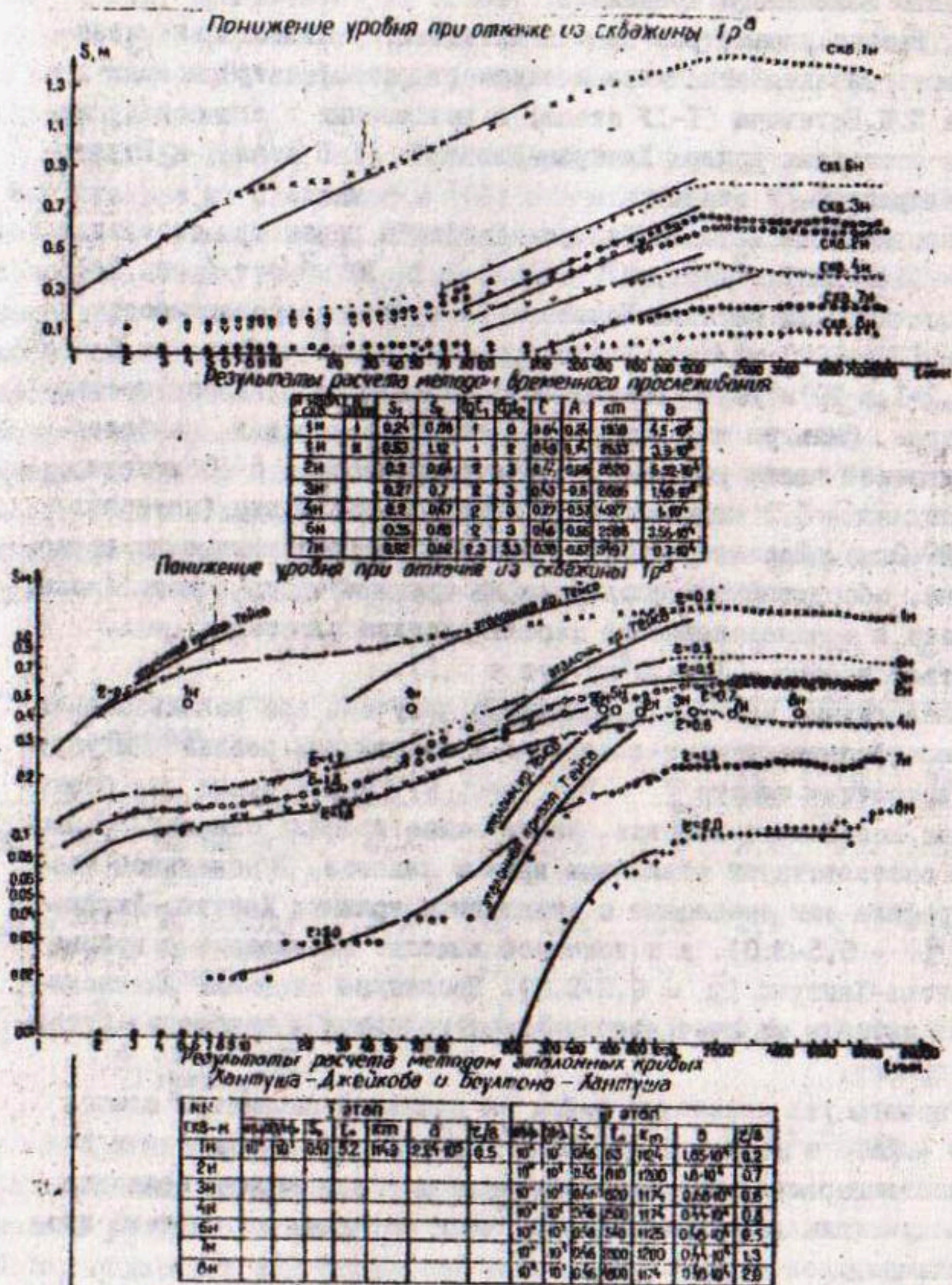


Рис. 24. Графики прослеживаний и результаты расчета параметров куста скв. 1р^а (участок "Алмазар", долина р. Чирчик).

верхнего возможного предела.

4. Расчет параметров пласта методами, учитывающими интенсивность питания откачки, — методом гидрогеофильтрационных палеток П.П.Нагевича (I–IV этапы) и положенных в его основу методов эталонных кривых Хантуша–Джейкоба (I–II этапы) и Боултона–Хантуша (III–IV этапы):

рассчитанные методом Хантуша–Джейкоба параметры составили:
 $k_{\text{п}} = 1149\text{--}1227 \text{ м}^2/\text{сут}$, $\alpha^* = 1,3\text{--}2,24 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$ (рис. 24);

рассчитанная методом Боултона–Хантуша водопроводимость $k_{\text{п}} = 1125\text{--}1227 \text{ м}^2/\text{сут}$. Уровнепроводность изменяется от $5 \cdot 10^3$ до $1,2\text{--}1,8 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$. Наименьшие значения наблюдаются по пьезометрам, фильтры которых располагаются в верхней, наиболее проницаемой части разреза: уровнепроводность — $5 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{сут}$, водоотдача — 0,2 верхнего слоя водоносного пласта (интервал 2,0–27,0 м). Параметры уровнепроводности, полученные по пьезометрам, оборудованным фильтрами на среднюю часть пласта, можно отнести к средневзвешенной характеристике пластов в целом (соответственно — $1,2 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$ и 0,1);

аналогичные значения параметров получены при использовании гидрогеофильтрационных палеток с соотношением реальной и упругой водоотдач пласта $\gamma = 100$ (рис. 9), характерных для безнапорных водоносных пластов. Фактические графики снижения полностью соответствуют эталонным кривым палеток. В начальной части графика они совпадают с эталонными кривыми Хантуша–Джейкоба ($\bar{t} = 0,5\text{--}3,0$), а в конечной выходят на эталонные кривые Боултона–Хантуша ($\bar{t} = 0,2\text{--}2,0$). Последние отражают интенсивность питания за счет привлекаемых ресурсов и положение питающих границ.

Расчеты уже позволяют выйти на реальные параметры пласта ($k_{\text{п}} = 1200 \text{ м}^2/\text{сут}$; $\alpha = 1,2 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$). Для убеждения в истинности параметра водопроводимости и установления величины

ΔL приводим дополнительные расчеты методами площадного прослеживания.

5. Расчет методами площадного прослеживания. График $S\text{--}\lg r$ (рис. 23) дает большой разброс точек. Прямая, проведенная через точки по пьезометрам 1н, 2н, наиболее удаленным от питаю-

ших границ, принимается за основу. Однако ввиду отступления от критерия применимости этого метода ($\bar{\tau} < 0,3$) по пьезометру № 2н ($\bar{\tau} = 0,7$) параметр водопроницаемости ($1349 \text{ м}^2/\text{сут}$) несколько завышен.

График $S - \lg(\frac{P}{r})$, в основу построения которого положены рассчитанные по зависимости (60) значения $\frac{P}{r}$, учитывающие положение рукавов реки, между которыми располагается опытная скважина. Точки графика удовлетворительно ложатся на прямую, выходящую на начало координат, что позволяет определить водопроницаемость ($1182 \text{ м}^2/\text{сут}$) и сделать вывод об отсутствии или незначительности сопротивления русловых отложений ($\alpha L \approx 0$). Доказательством достоверности рассчитанных этим методом параметров является близость $\bar{\beta}_i = \frac{P_i}{r_i}$, определенных по зависимости (60), с величиной $\beta_i = \frac{P_i}{r_i}$, установленной в процессе интерпретации методом гидрогеофильтрационных палеток или методом эталонных кривых Боутона-Хантуша (табл. I4).

Т а б л и ц а I4

Параметр	Номер пьезометра						
	1н	2н	3н	4н	6н	7н	8н
$\bar{\beta}_i = \frac{P_i}{r_i}$ по зависимости (60)	2,75	1,7	2,24	1,5	2,3	1,6	1,1
$\beta_i = \frac{P_i}{r_i}$ по методу эталонных кривых	4,4	1,9	2,2	1,57	2,4	1,5	1,1
$\bar{\tau} = \frac{\tau}{Bn}$ по методу эталонных кривых	0,2	0,7	0,6	0,8	0,5	1,3	2,0

6. Расшифровка структуры питания откачки или источников формирования ее дебита. Возможные источники питания – привлекаемые ресурсы (сток реки) и естественный поток подземных вод. Поток подземных вод ограничен шириной его фронта между рукавами реки ($L = 144 \text{ м}$) и при $Km = 1200 \text{ м}^2/\text{сут}$, $i = 0,005$ может быть оценен:

$$Q = 1200 \cdot 144 \cdot 0,005 = 864 \text{ м}^3/\text{сут} = 10 \text{ л/с}.$$

При расходе откачки в 78,5 л/с доля участия потока в ее питании составляет всего 12,7%. Основная часть расхода откачки из реки составляет 68,5 л/с, или 87,3%. Такая структура питания откачки подтверждается близостью рассчитанных и полученных при интерпретации данных β_1 и β_2 (табл. I4).

ГЛАВА 6. УТОЧНЕНИЕ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Теоретические основы оценки гидрогеологических параметров по результатам эксплуатации

Расчеты гидрогеологических параметров продуктивных водоносных горизонтов месторождений подземных вод по данным их эксплуатации позволяют оценить достоверность параметров, определенных по кустовым откачкам на стадии детальной разведки и на основе этого уточнить прогноз эксплуатационных запасов подземных вод конкретного водозаборного участка.

Выделены следующие приемы (способы) обработки результатов эксплуатации с целью оценки гидрогеологических параметров, которые уже нашли или найдут широкое применение в практике расчетов: аналитические и графоаналитические, основанные на уравнениях теории скважин и используемые для интерпретации данных ОФР; картографические, основанные на анализе гидродинамической структуры деформированного эксплуатацией потока подземных вод; численно-аналитические расчеты на ЭВМ и аналоговое моделирование.

I. Аналитические и графоаналитические способы обработки.

Основаны на анализе графиков понижений уровня под влиянием эксплуатации во времени и по площади. Эксплуатация водозаборов подземных вод вызывает интенсивное возбуждение водоносного горизонта, что приводит к формированию значительных по глубине и площади депрессионных воронок, форма которых отражает и влияние граничных условий водоносного горизонта. Водозаборное сооружение в этом случае можно рассматривать как скважину большого диаметра ("большой колодец") – при компактном расположении эксплуатационных скважин водозабора или как систему взаи-

модействующих эксплуатационных скважин — при расположении скважин на большой площади.

Теоретические основы расчета гидрогеологических параметров по данным ОФР рассмотрены применительно к четырем основным расчетным схемам (гл. 3). Использование некоторых этих методик для обработки результатов режимных наблюдений при эксплуатации водозаборов с целью определения гидрогеологических параметров представлено в работах Н.И.Плотникова (1973, 1979), В.С.Ковалевского (1986 г.).

Следует отметить, что длительная эксплуатация водозаборов в зависимости от источников их питания, сформированных воронок депрессии как локального, так и регионального характера определяет ряд особенностей использования методов обработки ОФР при интерпретации режимных наблюдений. Рассмотрим эти особенности применительно к выделенным расчетным схемам.

Схемы напорного и потенциально напорного пластов (месторождения подземных вод артезианских бассейнов) применимы только в условиях питания водозабора за счет сработки упругих запасов. Описываемый в этом случае уравнением Тейса неустановившийся процесс снижения напоров позволяет применять все основанные на этой зависимости методы расчета параметров как в условиях наличия границ, так и отсутствия (Боревский и др., 1979; МIRONENKO, Шестаков, 1978).

Схема напорного, квазинапорного пласта с перетеканием через разделяющие слои может применяться достаточно успешно по результатам эксплуатации водозаборов МПВ погребенных речных долин и конусов выноса в их периферийной части, для которых характерно переслаивание водоносных пластов со слабопроницаемыми разделяющими слоями. В зависимости от интенсивности эксплуатации, степени использования мощности водоносной слоистой толщи, изменчивости фильтрационных свойств водоносных и разделяющих слоев по глубине здесь возможно проявление как этой схемы, так и схемы, близкой к напорной, что характерно для условий максимального вовлечения в эксплуатацию водоносной толщи, когда водозабор по степени вскрытия эксплуатируемой толщи близок к совершенному.

Схемы потенциально (двухслойного) и собственно безнапорного пластов в условиях эксплуатации характеризуются проявлением только этапа гравитационного режима, что вызвано пропуском в замерах в начальный период эксплуатации этапов упругого и ложностационарного режимов, общая продолжительность которых не превышает несколько суток. Поэтому при эксплуатации безнапорного водоносного горизонта фиксируемый процесс снижения уровня подземных вод должен соответствовать зависимостям Тейса (при отсутствии дополнительного питания горизонта) или Хантуша-Джейкоба (при наличии питания) для условий гравитационной водоотдачи, что дает возможность применять методы расчета параметров для схем напорного и напорного с перетеканием пластов с отражением в расчетных методиках реальных граничных условий.

2. Картографический способ обработки. Влияние эксплуатации вызывает изменение гидродинамической структуры естественного потока подземных вод. Карты гидроизопьез (гидроизогипс) позволяют оконтурить область питания водозабора и снять основные характеристики потока в сечении на подходе потока подземных вод к водозабору и в сечении, расположенном ниже его. Перехват водозабором части потока отражается на картах уменьшением гидравлического градиента J потока.

На период отсутствия дополнительного питания в пределах воронки депрессии водозабора (для безнапорных вод) и стационарном режиме справедлива следующая зависимость между расходами потока, притекающего к водозабору $Q_в$ и оттекающего от него вниз по потоку $Q_н$, и расходом самого водозабора $Q_{вод}$:

$$Q_{вод} = Q_в - Q_н. \quad (66)$$

При $Q_в = km J_в B_в$; $Q_н = km J_н B_н$, решив зависимость (I) относительно km , получим:

$$km = \frac{Q_{вод}}{B_в J_в - B_н J_н}, \quad (67)$$

где $B_в$, $B_н$ - ширина области влияния водозабора в сечениях потока, расположенных на подходе к нему и ниже по потоку относительно водозабора; $J_в$, $J_н$ - уклоны потока подземных вод в тех же сечениях.

Этот способ обработки является приближенным и может быть применен при наличии режимной информации, позволяющей достаточно детально отразить структуру потока на площади в пределах области питания водозабора.

3. Численно-аналитические расчеты на ЭВМ и аналоговое моделирование. Среди методов математического моделирования для обработки результатов эксплуатации с целью уточнения гидрогеологических параметров представляют интерес следующие:

численно-аналитические методы (численные модели), в основе которых лежит решение на ЭВМ дифференциальных уравнений, записанных для каждого узла сетки области фильтрации применительно к методу конечных разностей (МКР) или методу конечных элементов (МКЭ). Базисом для оценки параметров МКР для ортогональной сетки разбивки являются работы Г.Н.Каменского, А.В.Лебедева, А.П.Киселева, а для треугольной сетки разбивки, позволяющей максимально использовать имеющуюся режимную информацию — Л.Лукнера, В.И.Вартельского. Треугольные сетки использует и МКЭ. Для обеих схем разбивки разработан ряд программ, позволяющих определить геофильтрационные параметры в расчетные периоды отсутствия локального питания горизонта (Гавич, 1980; Лукнер, Шестаков, 1986; Ломакин, 1978);

методы идентификации, представляющие собой численные расчеты на ЭВМ минимизации функционала между фактическими и расчетными понижениями уровня подземных вод. Расчетные понижения определяются для конкретной расчетной схемы методом последовательных приближений. В его основе лежат способы расчета и расчетные зависимости, проанализированные выше при изложении аналитического и графоаналитического способов обработки. Составлен ряд программ для оценки параметров пласта по результатам опытно-фильтрационных работ (Д.Алиев, Г.Д.Григорина, О.А.Дульките, Е.А.Ломакин и др.), среди которых наиболее полным является комплекс программ "Тидпар" (Дульките, 1982), использование которого при определенных условиях возможно и для обработки результатов эксплуатации;

методы расчета, представляющие реализованные на ЭВМ основные зависимости для конкретных расчетных схем, аналогичных

простейшим методам из графоаналитических способов расчетов (в частности, методы линейной анаморфозы), но отличающихся автоматизацией расчетов;

аналоговое моделирование может успешно применяться для участков эксплуатации с достаточно обоснованными источниками питания водозаборов и ресурсами подземных вод. Незнание этих факторов, определяющих величину понижения уровней под влиянием эксплуатации, наряду с неизвестными фильтрационными свойствами горизонта, делает постановку такой задачи некорректной. Это условие обязательно как для аналоговых, так и численных моделей. При его соблюдении геофильтрационные параметры пласта уточняются в процессе решения обратной или инверсной задачи (И.К.Гавич, И.И.Крашчн, И.С.Пашковский, В.М.Шестаков и др.).

В процессе решения таких задач представляет интерес предложенная В.Ф.Сидоренко (1984 г.) корректировка параметров геофильтрационного поля в точках расположения эксплуатационных скважин с использованием метода вариации масштабных коэффициентов, основанном на критерии подобия. Его сущность заключается в подборе на модели расхода скважины, обеспечивающего фактическое распределение напора, создаваемое эксплуатацией скважины. Это позволяет при известных расходах скважины, электрических сопротивлениях фильтрационного поля и подобранной на модели силы тока I рассчитать новое значение масштабного коэффициента λ_s (или λ_q) и из критерия подобия определить величину водопроницаемости. Следует отметить, что возможная относительная ошибка в определении $K_{пр}$ этим методом прямо пропорциональна относительной ошибке в определении фактического дебита скважины.

Требования к анализу результатов эксплуатации водозаборов подземных вод и обоснованию выбора способов расчета гидрогеологических параметров

Обработка результатов режимных наблюдений за эксплуатацией водозаборов необходима для уточнения представлений о гидрогеологической модели месторождения, особенностей проявления естественного и нарушенного эксплуатацией гидрогеологического

процесса, что позволяет, обосновав приемлемые для данного конкретного водозабора расчетную схему и способ обработки, получить обобщенную характеристику гидрогеологических параметров в целом по площади водозабора и в дальнейшем выйти на уточненный прогноз эксплуатационных запасов подземных вод водозаборного участка.

Анализ результатов наблюдений за эксплуатацией возможен при наличии сведений об основных характеристиках режима подземных вод, а также природных и искусственно созданных факторах, определяющих его поведение в годовом и многолетнем разрезе.

Обработке и анализу подлежат данные: о расходах водозабора за весь период эксплуатации с установлением причин их увеличения (подключение дополнительных скважин в прежних границах водозабора или расширения площади водозабора); о расходах каждой эксплуатационной скважины, времени ее работы; о напорах и понижениях уровня как по эксплуатационным, так и наблюдательным скважинам в пределах воронки депрессии водозабора; о количественной характеристике естественных и искусственных факторов, определяющих источники питания водозабора за весь период эксплуатации (расходы реки, каналов; водоподача на орошение территории).

Материалы представляются в виде графиков прослеживания основных показателей подземных вод, отражающих влияние эксплуатации, во времени в многолетнем разрезе, карт гидроизогипс (гидроизопьез), понижений уровня, изоамплитуд разгрузки и наполнения.

Анализ представленного материала возможен в виде нахождения корреляционных связей между понижением и водоотбором, понижением и основными режимобразующими факторами с использованием методов факторного и кластеранализов, выделения на гидродинамических схемах области питания водозабора (ее изменение во времени под влиянием различных факторов — увеличения водоотбора, питания подземных вод в пределах воронки депрессии и т.д.), что позволяет выявить основные источники и обосновать реальную расчетную схему для оценки гидрогеологических параметров.

При использовании основного графоаналитического способа обработки результатов эксплуатации порядок расчета предусматривает:

предварительный выбор расчетной схемы;

выбор основных расчетных зависимостей с учетом характера режима подземных вод под влиянием эксплуатации (установившееся, не установившееся движение);

определение центра тяжести водозабора, относительно которого используются фактические величины понижений в наблюдательных скважинах, расположенных за пределами водозабора (при компактном размещении его эксплуатационных скважин). Координаты центра тяжести (x, y) можно установить по зависимостям

$$x = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_{\text{вод}}} x_i, \quad y = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_{\text{вод}}} y_i, \quad (68)$$

где Q_i — дебит каждой эксплуатационной скважины; x_i, y_i — координаты той же скважины в любой произвольно выбранной системе;

определение приведенного расстояния наблюдательной скважины до эксплуатационных $r_{\text{пр}}$, учитывающего положение и расход каждой из них (наблюдательная скважина расположена непосредственно на участке водозабора), а при наличии границ — и приведенного расстояния до зеркально отображенных относительно границы эксплуатационных скважин $R_{\text{пр}}$, учитывающего в расчетных зависимостях ее влияние;

$$r_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_{\text{вод}}} r_i, \quad R_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_{\text{вод}}} R_i; \quad (69)$$

изменение дебита водозабора в процессе эксплуатации учитывается введением приведенного времени:

$$r_{\text{пр}} = \frac{Q_1 r_1 + Q_2 r_2 (t - t_1) + \dots + Q_n r_n (t - t_{n-1})}{Q_{\text{вод}}}, \quad (70)$$

окончательное установление типа расчетной схемы на основе анализа графиков временного прослеживания в координатах $S - r_{\text{пр}}$,

$$S/Q - r_{\text{пр}}, S - r_{\text{пр}}; S/Q - r_{\text{пр}};$$

выбор метода расчета (или комплекса) параметров и основных расчетных зависимостей на основании схемы и имеющейся информации;

при наличии нескольких наблюдательных скважин расчеты проводятся по каждой из них, что позволяет уточнить параметры или определить их изменение по площади водозабора;

результаты расчетов желательно подтвердить другими способами обработки, в частности, картографическими и численно-аналитическими, которые предъявляют более высокий уровень требований к объему и качеству информации.

Результаты расчета гидрогеологических параметров по данным эксплуатации месторождений

I. Месторождения подземных вод с простыми гидрогеологическими и эксплуатационными условиями. Анализируются результаты эксплуатации водозабора подземных вод, расположенного на одном из участков месторождения подземных вод долины За-рафшан.

Основные особенности участка месторождения следующие:

продуктивный водоносный горизонт приурочен к хорошо проницаемым аллювиальным (мощность 12-15 м) и относительно менее проницаемым пролювиальным отложениям (35-40 м);

сток по руслу реки круглогодичный, расходы реки изменяются в течение года от 200 до 2 м³/с;

продолжительность прохождения по реке минимальных расходов (выклинивающиеся в русло выше по долине грунтовые воды) в маловодные годы не превышает 2-3 мес.;

естественный режим УПВ полностью отражает изменение уровня в реке с естественной амплитудой 1,5-2,0 м.

Водозабор эксплуатируется в течение 15 лет. В его состав входя 9 эксплуатационных скважин, расположенных по параллельному реке ряду на расстоянии 50-200 м. Расходы скважин - 48,6-83,3 л/с при понижениях 10-14 м. Суммарный расход водозабора в течение года меняется от 45 до 55 тыс. м³/сут (в сред-

нем 50 тыс. м³/сут). Из-за небольшого количества наблюдательных скважин воронка депрессии по площади не прослеживается. Она приурочена непосредственно к водозаборному ряду и характеризуется несущественным понижением зеркала подземных вод. Понижения изменяются от 1,5–2 м (вне эксплуатационного ряда) до 3,5–4 м (по линии ряда вблизи эксплуатационных скважин). Схема расположения водозабора и положение депрессионной воронки в разрезе приведены на рис. 25.

Методика оценки гидрогеологических параметров основывается на следующих положениях, определяемых опытом эксплуатации: движение подземных вод установившееся; река, расходы которой значительно превышают дебит водозабора, может быть принята за границу I рода с постоянным напором. Соответственно для оценки параметров принята схема полусограниченного пласта с границей I рода. Параметры определяются по зависимости

$$K\pi = \frac{Q_i}{2\pi S_i} \rho_n \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_3 \dots \rho_n}{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \dots r_n}, \quad (71)$$

где Q_i – средний расход эксплуатационной скважины водозабора; S_i – понижение в пьезометре; $r_1, \dots, r_n$ – расстояние пьезометра до каждой эксплуатационной скважины; $\rho_1, \dots, \rho_n$ – расстояние пьезометра до каждой зеркально отображенной относительно границы эксплуатационной скважины.

Расчет коэффициента водопроводимости, произведенный относительно пьезометра IIH (рис. 25), приведен в табл. 15.

Т а б л и ц а 15

Результаты расчета параметров по пьезометру IIH

Номер скв.	$r, \text{ м}$	$\lg r$	$\rho, \text{ м}$	$\lg \rho$	$Q_{\text{вод}}, \text{ м}^3/\text{сут}$	$Q_c = \frac{Q_{\text{вод}}}{n}$	$S_i, \text{ м}$ скв. IIH	$K\pi = \frac{230 Q_c}{2\pi S_i} \left(\sum_{i=1}^n \lg \rho_i - \sum_{i=1}^n \lg r_i \right)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1э	740	2,87	900	2,954				
2э	440	2,64	800	2,9				
6э	360	2,556	600	2,78				
3э	210	2,322	600	2,78	50000	5550	3,0	1280,5

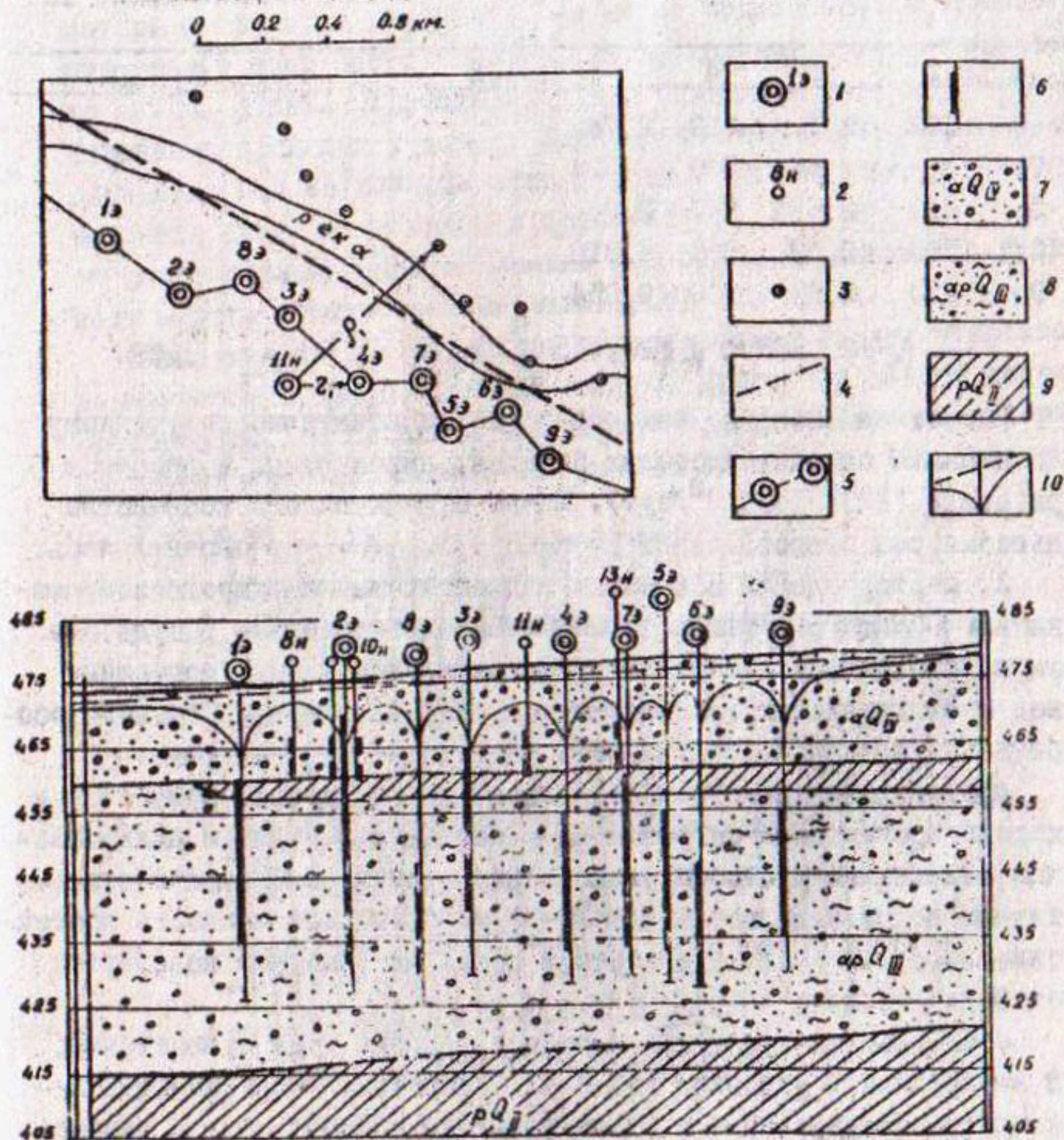


Рис. 25. Схема водозабора М и разрез (данные П. Б. Неймана). Скважины: 1 — эксплуатационные, 2 — наблюдательные, 3 — зеркально отображенные относительно границы эксплуатационные; 4 — условная линия границы I рода; 5 — линия разреза; 6 — положение фильтра скважин; 7 — современные аллювиальные галечники; 8 — верхнечетвертичные аллювиально-пролювиальные отложения; 9 — среднечетвертичные пролювиальные отложения; 10 — положение депрессионной воронки.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4а	200	2,3	550	2,74				
7а	350	2,544	530	2,724				
5а	430	2,633	640	2,8				
6а	590	2,77	650	2,813				
9а	830	2,92	900	2,954				

$$\sum_{i=1}^n \rho_g \tau_i = 23,555 \quad \sum_{i=1}^n \rho_g \beta_i = 25,445 \quad \sum_{i=1}^n \rho_g \beta_i - \sum_{i=1}^n \rho_g \tau_i = 1,89.$$

Расчетное значение водопроводимости идентично полученному по данным опытных кустовых откачек, выполненных в процессе разведки (1200–1400 м²/сут). Из-за ограниченного количества пьезометров сопротивление речного русла ΔL не определялось.

2. Месторождения подземных вод со сложными гидрогеологическими и эксплуатационными условиями. Анализировались результаты эксплуатации водозаборов в пределах месторождения подземных вод в аллювиальных галечниках долины р. Ахангаран. Основные особенности водозаборных участков месторождения следующие:

продуктивный водоносный горизонт месторождения приурочен к хорошо проницаемым современным и верхнечетвертичным аллювиальным отложениям и относительно менее проницаемым верхнечетвертичным отложениям мощностью 25–30 м. Суммарная мощность продуктивного водоносного горизонта в пределах участков колеблется от 30 до 65 м;

сток реки по руслу изменяется в течение года существенно. В ненарушенных условиях (до начала действия водохранилища сезонного регулирования в 60 км вверх по долине) сток в паводок имел большие расходы (до 300–400 м³/с) и незначительные в межень (до 5 м³/с и менее). В отдельные месяцы маловодных лет сток по реке отсутствовал полностью (август, сентябрь). Регулирующее действие водохранилища выразилось в существенном снижении паводковых расходов (не более 200 м³/с), смещении пика паводка на 1–2 мес., увеличении меженных расходов реки (до 10 м³/с) и некотором уменьшении продолжительности периода минимальных меженных расходов (1–2 м³/с и менее) до 1–1,5 мес.;

питание подземных вод осуществляется круглогодично за счет потерь из реки на участке в 7-8 км от водозаборов и трансформируется в виде естественного потока подземных вод, подходящего к ним, а также периодически при больших паводках непосредственно в пределах участка. Подчиненное значение имеет питание подземных вод на площади этих участков за счет потерь поверхностного стока из каналов и оросителей;

естественный режим подземных вод отражает изменение уровня воды в реке с естественной амплитудой 1,5-3,0 м.

Эксплуатация подземных вод ведется более 35 лет и начата водозабором С, расположенным поперек межгорной долины перед ее расширением, на выходе в предгорную равнину. Расход за период эксплуатации увеличился с 0,5 до 1,8 м³/с (рис. 26), что потре-

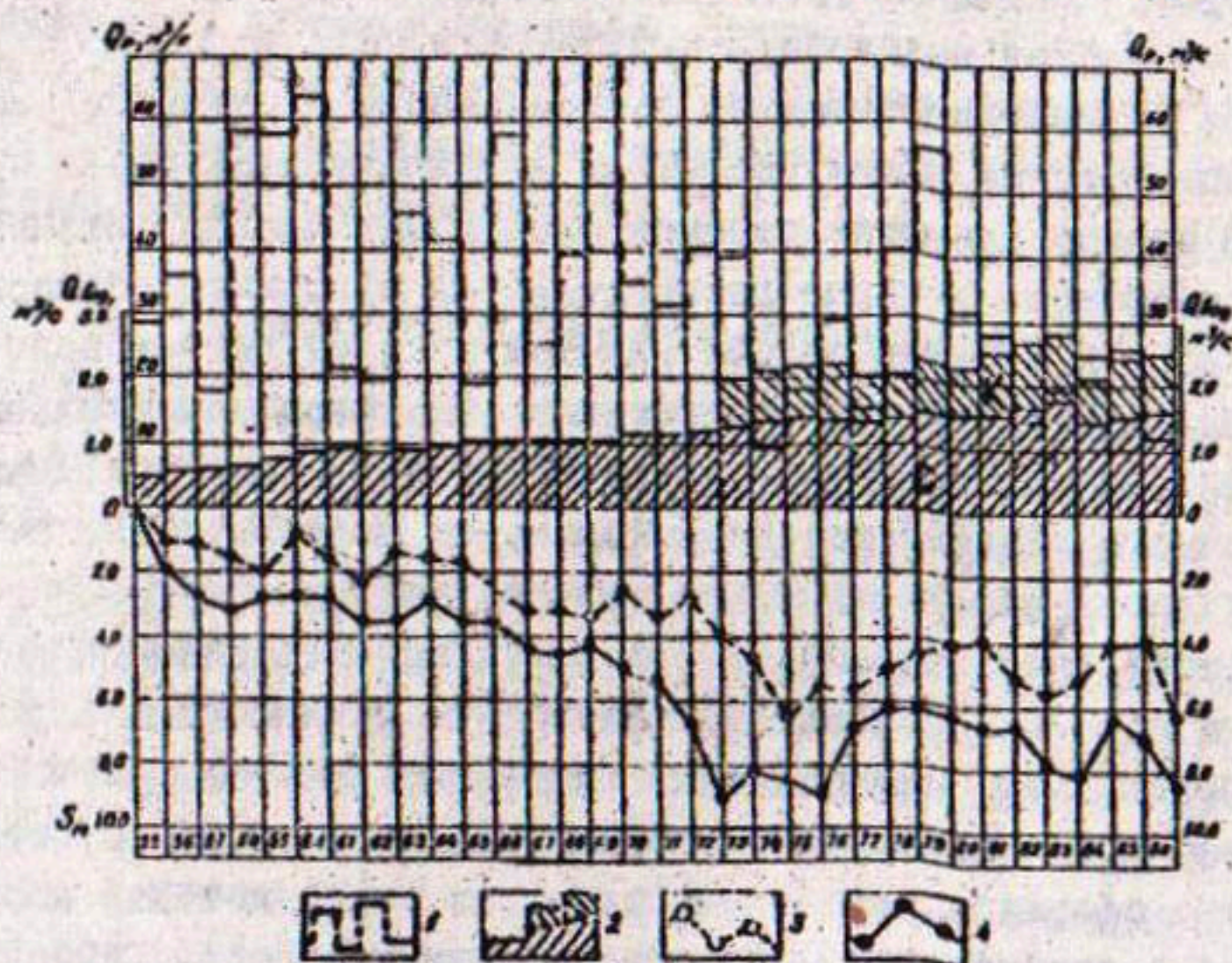


Рис. 26. Графики изменения водоотбора, понижений уровня и расхода реки в многолетнем разрезе (данные В.М.Дубинского): 1 - расход реки; 2 - расходы водозабора С и К; 3 - понижение уровня в центре водозабора С на высокое положение уровня; 4 - то же, на низкое положение уровня.

бовало увеличения количества эксплуатационных скважин (35). Средний расход скважин - 50-80 л/с, понижения достигают 10-

15 м от первоначального естественного уровня.

Под влиянием эксплуатации сформирована депрессионная воронка. Максимальное понижение в ее центре с удалением от реки достигает 7-8 м на низкое положение уровня маловодных лет. В период высокого положения, соответствующего прохождению больших расходов по реке, размеры воронки по площади и глубине уменьшаются. Понижение в центре воронки не превышает 5-6 м. Амплитуда колебания уровня по сравнению с естественной увеличилась на 2-3 м и составила 4-5 м.

Выше водозабора С с 1972 г. действует водозабор К с площадной схемой расположения эксплуатационных скважин (14). Расстояние между ними - 400-500 м. Единая воронка депрессии здесь отсутствует, понижения уровня от естественного не превысили 1,5-2,0 м. Расход водозабора - 0,7-0,8 м³/с.

Расчет параметров выполнен по водозабору С, влияние эксплуатации которого на режим подземных вод проявилось более существенно. В основу расчетов положен анализ источников питания этих водозаборов, которые распределяются следующим образом:

водозабор К - отбор осуществляется за счет потерь воды с орошаемых территорий и из оросителей. В период максимального поступления воды из этих источников они не только обеспечивают работу самого водозабора, но и формируют дополнительно сезонные (регулируемые) емкостные запасы, которые отбираются в период отсутствия питания, слабо влияя на естественный поток подземных вод, сформированный на участке долины выше водозабора С и подходящий к нему без существенной деформации;

водозабор С - питается в основном за счет этого естественного потока, сформированного под влиянием реки, которая косвенно участвует в его питании, частично заполняя в период высоких уровней осушенную часть емкости, полностью используемой водозабором при снижении напора в реке до наиболее низкого его положения, снимающей часть нагрузки с потока подземных вод.

Таким образом, питание водозабора С можно представить в виде:

$$Q_{\text{вод}} = \Delta Q_{\text{еп}} + \Delta Q_{\text{р}}$$

- в период паводка;

$Q_{\text{вод}} = \Delta Q_{\text{еп}}'' + \frac{\Delta H_{\text{р}} \cdot F}{t}$ в период t уменьшения расходов в реке до минимальных; $Q_{\text{вод}} = \Delta Q_{\text{еп}}'''$ - в период минимального стока по реке или его отсутствия; $\Delta Q_{\text{еп}}', \Delta Q_{\text{еп}}'', \Delta Q_{\text{еп}}'''$ - разность расходов потока, протекающего через водозабор, в верхнем $Q_{\text{в}}$ и нижнем $Q_{\text{н}}$ сечениях; $\Delta Q_{\text{еп}} = Q_{\text{в}} - Q_{\text{н}}$; $\Delta Q_{\text{еп}}' < \Delta Q_{\text{еп}}'' < \Delta Q_{\text{еп}}'''$, т.е. наблюдается саморегулирование использования естественного потока подземных вод - в зависимости от интенсивности дополнительного питания непосредственно на площади водозабора увеличивается или уменьшается отток подземных вод за пределы водозабора; $\Delta Q_{\text{р}}$ - часть дополнительного питания водоносного горизонта за счет реки, идущая на питание водозабора в этот период. Оставшаяся часть питания формирует емкостные запасы подземных вод в зоне мощностью $\Delta H_{\text{р}}$, в пределах площади воронки депрессии F , вызывая повышение уровня.

Исходя из установленных источников питания водозабора С и особенностей их изменения во времени для расчета параметров используются способы расчета 1, 2.

Графоаналитические способы расчета

1. Косвенное участие реки через поток подземных вод в питании водозабора С позволяет схематизировать влияние реки и естественного потока в виде границы I рода. Эта граница условна, но то, что сумма минимальных расходов реки и естественного потока подземных вод превышает величину отбора, позволяет принять такой вариант как вполне приемлемый и отвечающий природным условиям. Расчет производится по наблюдательным скважинам 36н и 225н, расположенным соответственно в зоне максимальных понижений в удалении от реки и вблизи к ней. По скв. 36н понижение составило на низкое положение уровня 1977г. - 6,4 м, по скв. 225н - 3,2 м. Расход водозабора на это время 1,43 м³/с.

Расчет производится по зависимости:

$$kM = \frac{0.366}{S_1} \sum_{i=1}^n Q_i \lg \frac{\rho_i}{r_i},$$

/72/

в которой обозначения аналогичны /71/; Q_i - расход каждой

эксплуатационной скважины; S_i – понижение в скв. 36н или 225н.

Результаты расчета сведены в табл. 16.

Т а б л и ц а 16

Расчет коэффициента водопроводимости

Номер скв.	$\sum_{i=1}^n Q_i \rho_g r_i$	$\sum_{i=1}^n Q_i \rho_i$	$\sum_{i=1}^n Q_i \rho_g \frac{\rho_i}{r_i}$	S_i	M
36н	3949	4837,5	888,5	6,4	4390
225н	4122	4550	428	3,2	4230

Результаты указывают на близкие значения водопроводимости как в приречной, так и тыловой частях водозабора. Расчеты выполнены на максимально достигнутые понижения при условии стационарности режима фильтрации в этот период.

2. Фактический график изменения уровня подземных вод, отражая факторы питания и разгрузки под влиянием естественных и искусственных причин, характеризуется или интенсивным подъемом уровня (в период максимального питания), или таким же его снижением (в период отсутствия или недостаточного питания). Река при наличии стока контролирует положение зеркала подземных вод на площади водоносного горизонта. При высоком положении уровня воды в реке и соответствующем этому напору на границе зеркала грунтовых вод формируется стационарная воронка депрессии, отвечающая граничным условиям горизонта. При резком снижении напора воды в реке воронка депрессии стремится к расширению и углублению, отвечающим новому, более низкому, напору на границе. В этот период часть емкости горизонта, заключенная между депрессионными воронками, сформированными на двух крайних стационарных положениях, не контролируется рекой, а подвергается действию местных и региональных зон разгрузки как естественных, так и искусственных, среди которых преобладает искусственная разгрузка (водозабор). Поэтому процесс снижения уровня в этот период определяется практически только величиной отбора подземных вод в условиях не проявления действия границ, т.е. близких к условиям неограниченного водоносного горизонта. Этот процесс хорошо иллюстрирует рис. 27 и описывается следую-

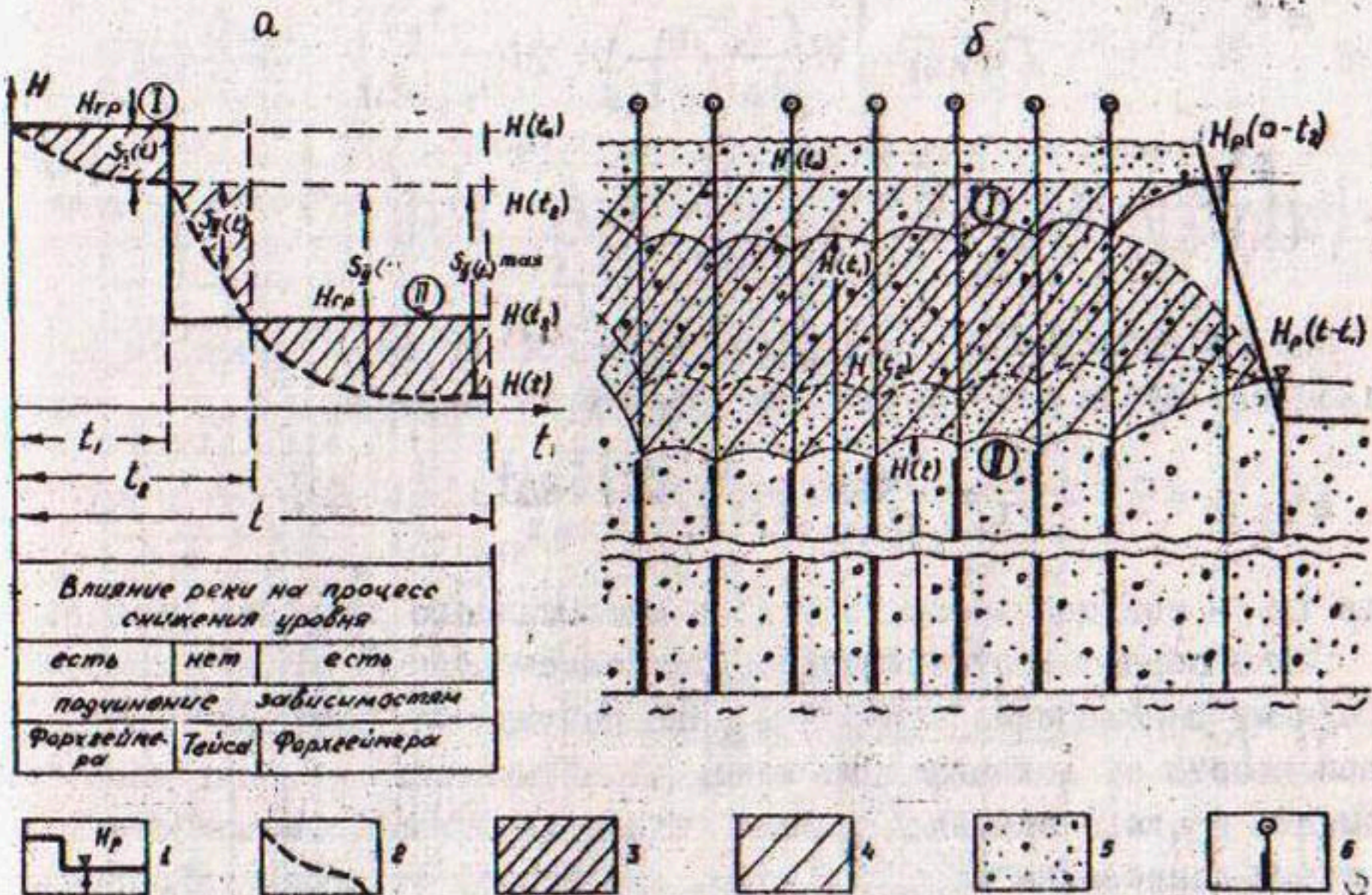


Рис. 27. Схема к обоснованию выделения периода условно независимого от реки режима эксплуатации. График изменения напоров на границе H_p и подземных вод H_t (а), схема взаимодействия подземных вод с рекой в условиях эксплуатации (б): график изменения: 1 – напоров на границе; 2 – уровня подземных вод под влиянием эксплуатации и изменения напоров на границе; 3 – зона воронки депрессии, формирующаяся в период условно независимого от реки режима; 4 – зоны воронки депрессии, образованные действием эксплуатации с учетом влияния границы в положении I и II; 5 – аллювиальные отложения; 6 – эксплуатационная скважина.

щими зависимостями.

Понижение при положении I напора в реке:

$$S_I = \frac{Q}{4\pi km} \left[W\left(\frac{r^2_{np}}{4at}\right) - W\left(\frac{\rho^2_{np}}{4at}\right) \right]. \quad (73)$$

Понижение при положении II напора в реке:

$$S_{II} = \frac{Q}{4\pi km} \left[W\left(\frac{r^2_{np}}{4a(t_2-t_1)}\right) + W\left(\frac{r^2_{np}}{4a(t-t_2)}\right) - W\left(\frac{\rho^2_{np}}{4a(t-t_2)}\right) \right]. \quad (74)$$

Относительное понижение при положении II в сравнении с понижением при положении I:

$$\Delta S_{I-II} = S_{II} - S_I = \frac{Q}{4\pi km} \left[W\left(\frac{r^2_{np}}{4a(t_2-t_1)}\right) + W\left(\frac{r^2_{np}}{4a(t-t_1)}\right) - \right. \\ \left. - W\left(\frac{r^2_{np}}{4a(t-t_1)}\right) - W\left(\frac{r^2_{np}}{4at}\right) + W\left(\frac{r^2_{np}}{4at}\right) \right]. \quad (75)$$

При наступлении квазистационарного режима при неизменном положении русла реки уравнение упрощается до вида

$$\Delta S_{I-II} = S_{II} - S_I = \frac{Q_{вод}}{4\pi km} \rho_n \frac{2.25a(t_2-t_1)}{r^2_{np}}, \quad (76)$$

где t_2 — текущее время от начала интенсивного снижения уровня.

Таким образом, относительное снижение уровня в период между крайними положениями напоров в реке подчиняется прямолинейной зависимости от логарифма времени, отсчитываемого относительно момента резкого снижения уровня воды в скважинах, вызванного быстрым изменением напора в реке. Это позволяет провести обработку снижения уровня методами временного прослеживания или эталонных кривых Тейса-Хантуша в пределах таких периодов как отдельно, так и используя типовую кривую снижения уровня, объединившую процесс снижения отдельных периодов в единую кривую. Эта кривая, отражающая процесс снижения уровня под влиянием водоотбора без воздействия реки, может быть составлена на основе анализа графиков изменения напоров во времени в многолетнем разрезе. Принцип такого построения по скв. 36 приведен на рис. 28. Кривая положена в основу определения параметров методами временного прослеживания и эталонных кривых Тейса-Хантуша. Характеризующие ее величины понижения уровня на различные моменты времени от начала спада изображены в виде графиков прослеживания в координатах $S - \rho g t$ и $\rho g S - \rho g t$ (рис. 29). Результаты расчета параметров этими методами приведены в табл. 17.

Картографический способ расчета

Построенные карты гидроизопьез участка водозабора на высокое и низкое положение уровня (рис. 26) позволили оконтурить область питания водозабора и снять геометрические характерис-

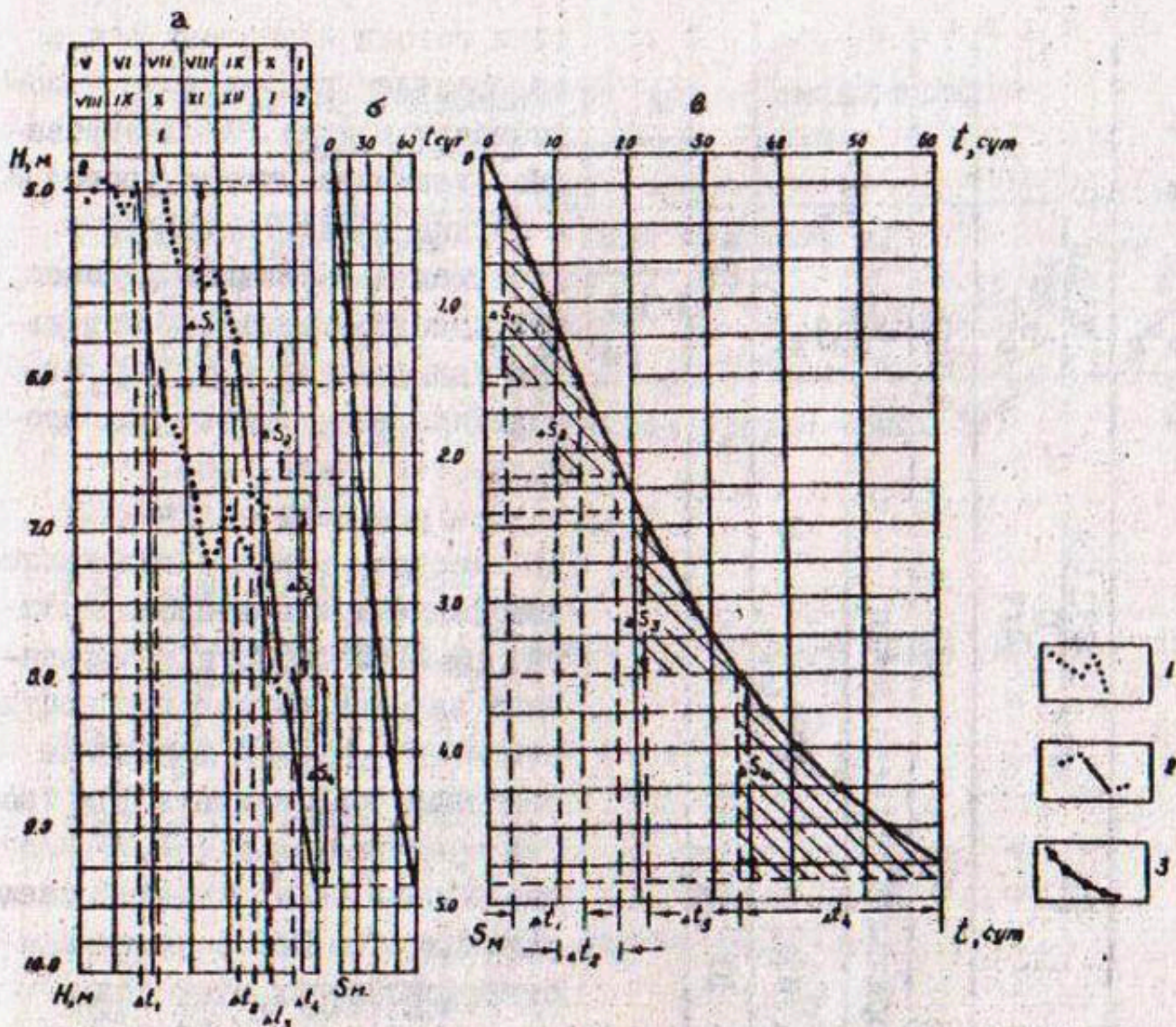


Рис. 28. Схема к обоснованию построения типовой кривой снижения уровня (б, в) под влиянием эксплуатации по данным многолетних режимных наблюдений по скв. 36н (а): 1 – участки графика режимных наблюдений в периоды, подверженные влиянию реки; 2 – то же, в периоды условно независимого от реки режима, положенные в основу построения типовой кривой снижения уровня; 3 – типовая кривая снижения уровня.

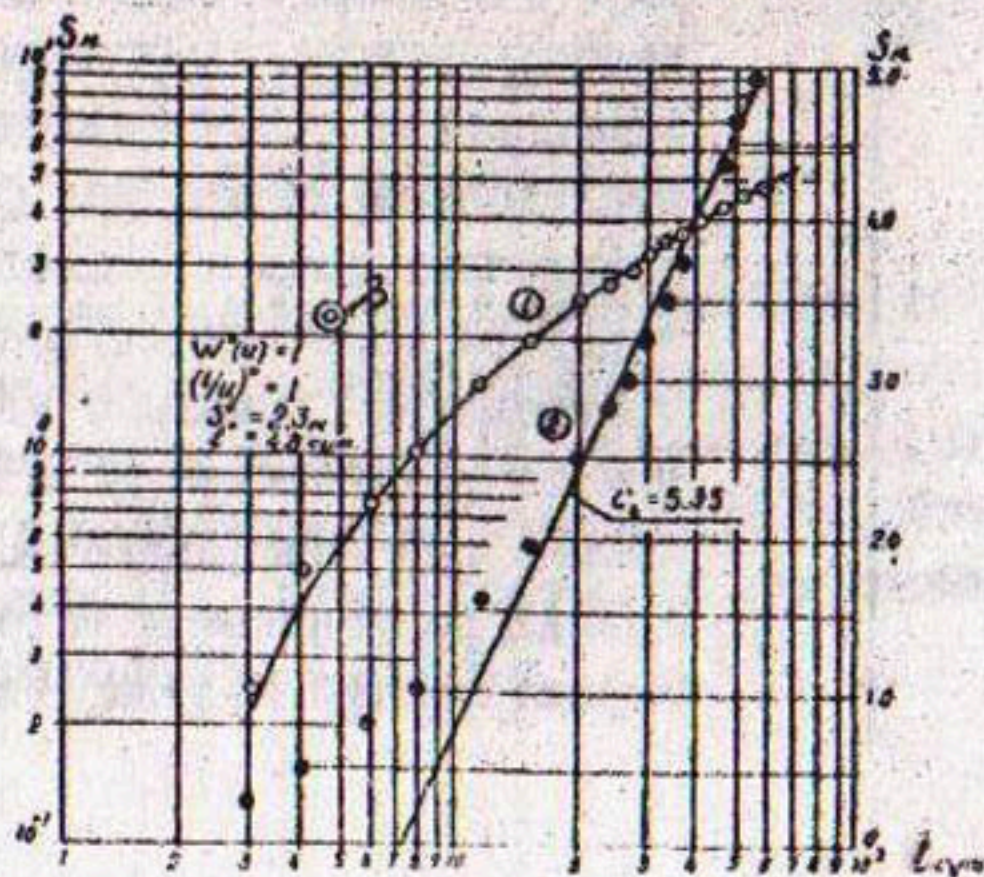


Рис. 29. Графики прослеживания понижения уровня в центре водозабора С во времени. Точки зависимости графика: 1 – $\lg S - \lg t$; 2 – $S - \lg t$; 3 – расчетная точка.

Таблица 17

Номер скважины	Расход воды забора	$r_{пр}$, м	Тип графика	C	t_i , сут	$km = \frac{0,183 Q_в}{C} \frac{м^2}{сут}$	$Q = \frac{r_{пр}^2}{2,25 t} \frac{м^2}{сут}$
36н	$\frac{1,46}{123\ 552}$	560	S - Pgt	5,36	7,0	4200	$2 \cdot 10^4$
Координаты расчетн. точки							
				$w_0(u) : (1/u)_0$	S_0	t_0	$km = \frac{Q}{4\pi S_0} \frac{м^2}{сут}$
				1	10	23	48
				Pgs - Pgt			
				$1,57 \cdot 10^4$			

Т а б л и ц а 18

Расчет водопроводимости на основе анализа гидродинамической структуры потока

Перед водозабором				Ниже водозабора				$\text{км} \frac{Q_в}{\Delta B_i \cdot J_i}$ $\text{м}^2/\text{сут}$
B_i м	$\frac{\Delta H}{L_i}$, м	J_i	$B_i \cdot J_i$	B_i м	$\frac{\Delta H}{L_i}$, м	J_i	$B_i \cdot J_i$	

На низкое положение уровня (рис. 30)

400	$\frac{3}{350}$	0,0086	3,4					
450	$\frac{5}{450}$	0,0125	5,625					
700	$\frac{5}{350}$	0,0143	10,6	500	$\frac{3}{1100}$	0,0027	1,35	28,78 4292
600	$\frac{5}{500}$	0,01	6,0					
650	$\frac{5}{650}$	0,0077	5,05					
$\Sigma B_i \cdot J_i = 30,03$							1,35	

На высокое положение уровня

450	$\frac{3}{350}$	0,0085	3,85					
500	$\frac{3}{250}$	0,012	6,0					
600	$\frac{3}{250}$	0,012	7,2	1300	$\frac{3}{800}$	0,00375	4,875	25,175 4907
600	$\frac{3}{300}$	0,01	6,0					
700	$\frac{3}{300}$	0,01	7,0					
$\Sigma B_i \cdot J_i = 30,05$								

ласти фильтрации и моделирующих устройств составил 0,2 в/м. Результаты расчета коэффициентов водопроводимости этим методом изложены в табл. 19, в которой приводятся подобранная в процессе моделирования величина силы тока J , фактический дебит скважины Q , рассчитанные по этим данным значения масштабного коэффициента Δq и kh .

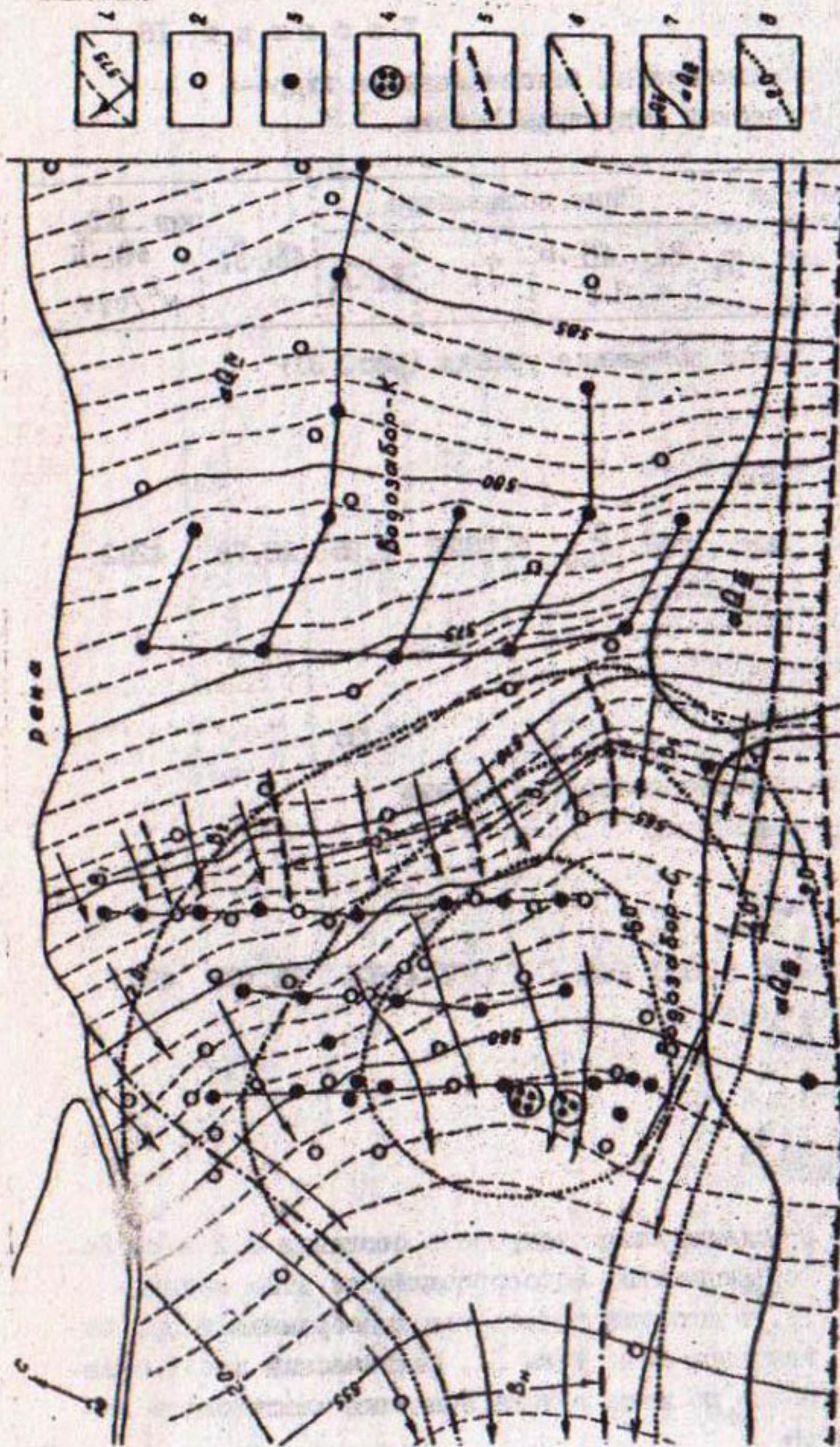


Рис. 30. Гидрогеологическая структура потока в условиях эксплуатации (низкое положение уровня подземных вод): 1 - гидроизогипсы и линии тока; скважины: 2 - наблюдательные, 3 - эксплуатационные, 4 - группы (кусты) эксплуатационных скважин; 5 - положение южной границы месторождения подземных вод; 6 - границы зоны потока подземных вод, участвующего в питания водозаборов; 7 - границы водоносных комплексов в современных ($Q_{\text{н}}$) и верхнечетвертичных ($Q_{\text{в}}$) аллювиальных отложениях; 8 - изолинии понижений уровня.

Т а б л и ц а 19

Результаты расчета Kh для некоторых скважин

Номер скважины	$\gamma, \mu A$	$Q, м^3/сут$	Δq	$Kh, м^2/сут$
4а	42	4320	102,8	2571
5а	45	4147	92,2	2308
1а	47	5443	115,8	2895
2а	44	4493	102,1	2552
3а	44	6480	154,3	3857
22а	46	8035	174,7	4370
21а	70	5443	77,8	1943
20а	29	5357	184,7	4617
19а	66	5357	81,2	2029

Из численно-аналитических методов расчета апробирован метод балансовых полигонов (Вартельский, 1979 г.) по результатам которого получены значения $Q = 1,4-5,10^4 м^2/сут$. Результаты расчета параметров различными методами приведены в табл. 20.

Т а б л и ц а 20

Сравнительная таблица результатов расчета гео-фильтрационных параметров различными методами

Метод (способ) расчета и зависимость	Исходный материал	Результат		
		$km, м^2/сут$	$Q, м^2/сут$	μ
1	2	3	4	5

Эксплуатация

Графоаналитические и аналитические способы

Зависимость Форхгеймера

Понижения по набл.

скв. 36н

4390

-

-

225н

4230

-

-

Временное прослеживание

То же,

скв. 36н

4200

 $2 \cdot 10^4$

0,21

1	2	3	4	5
Эталонная кривая Тейса Сква. 36н		4270	$1,57 \cdot 10^4$	0,27
Картографический способ	Карты гидроизогипс <i>mil</i> (рис. 26)	4292 4907	-	-
Аналоговое моделирование, метод вариации масштабных коэффициентов	Расходы экспл. скважин	1943- 4617	-	-
Метод балансовых полигонов	Уровни по наблюдат. скважинам		$1,39 \cdot 5,4 \cdot 10^4$	
Разведка				
Аналитические расчеты, зависимость Дюпюи	Результаты опытных откачек (ОФР)	5281-6551, по скв. 13р, 14р ≈ 15000	-	-

В целом, наблюдается хорошая сходимость параметров, рассчитанных различными методами и способами. Величина $Km = 4200-4907 \text{ м}^2/\text{сут}$ характеризует средневзвешенную в пределах воронки депрессии водозабора водопроводимость, отнесенную к уменьшенной в процессе эксплуатации на величину понижения мощности водоносного горизонта. При преобладающих значениях $Km = 5000-6000 \text{ м}^2/\text{сут}$, пересчитанных по результатам разведки, коэффициент фильтрации верхней зоны горизонта в интервале до 30-40 м равен 150-200 м/сут, при понижениях уровня относительно статических на анализируемый период 6-8 м уменьшение водопроводимости за счет осушения части горизонта составляет 1000-1500 $\text{м}^2/\text{сут}$, что позволяет считать полученные параметры достаточно убедительными. Отмеченные в табл. 20 экстремальные значения Km , по данным ОФР, являются завышенными, что объясняется несовершенством примененной методики расчета и условиями проведения откачек (заболоченность, наличие дрен). Скудность информации не позволяет произнести их перерасчет. При оценке эксплуатационных запасов по результатам разведки приняты несколько завышенные параметры - $K = 112,3 \text{ м/сут}$ при мощности 80 м ($Km = 8895 \text{ м}^2/\text{сут}$).

3. Месторождения подземных вод с весьма сложными гидрогеологическими эксплуатационными условиями. Сложность месторождений этой группы обусловлена:

наличием в верхней части разреза месторождений водоносных горизонтов, содержащих подземные воды некондиционного состава;

возможностью привлечения этих вод в процессе эксплуатации к водозабору путем перетекания через слабопроницаемые разделяющие слои или же по зонам тектонических нарушений (разломов);

гидрохимической неоднородностью подземных вод в пределах эксплуатируемого водоносного горизонта, что вызывает возможность подтягивания некондиционных вод к водозабору;

фильтрационной неоднородностью водоносных горизонтов;

ограниченностью запасов пресных подземных вод месторождений, нерациональная эксплуатация которых может вызвать как истощение запасов, так и ухудшение качества отбираемых подземных вод.

Для месторождений этой группы обоснование оптимального варианта эксплуатации является чрезвычайно важным, а достоверность оценки фильтрационных параметров определяющей, чему, безусловно, способствует опыт эксплуатации водозаборов подземных вод.

Рассмотрим результаты эксплуатации двух месторождений подземных вод.

Месторождение пресных подземных вод в аллювиальных неоген-четвертичных отложениях палеосырдарьи находится в пределах Голодной степи и характеризуется следующими особенностями:

пресные подземные воды развиты в среднечетвертичных (Q_{II}), нижнечетвертичных (Q_I) и верхнеплиоценовых (N_3) аллювиальных отложениях, залегающих на глубине от 100 до 600 м;

водоносные комплексы представляют гидравлически связанную через разделяющие слои единую водоносную толщу с преимущественно вертикальной фильтрацией снизу вверх;

перекрывающий эту толщу водоносный комплекс в верхнечетвертичных отложениях (Q_{III}) содержит подземные воды повышенной минерализации и отделен от нижележащих слабопроницаемым разделяющим слоем различной мощности, сплошность которого нарушена на

отдельных участках, где и наблюдается его прямая гидравлическая связь с нижележащими;

основное поступление пресных подземных вод к месторождению происходит за счет подземного притока со стороны современного правого берега р. Сырдарья, формирующегося в аллювиально-пролювиальных отложениях ее правобережных притоков;

Сырдарья в пределах месторождения дренирует подземные воды всех водоносных комплексов. Интенсивность дренирования уменьшается с увеличением глубины залегания и определяет дальность проникновения пресных подземных вод в пределах Голодной степи по каждому комплексу.

Эксплуатация подземных вод ведется водозабором Г в течение 15 лет. Водозабор расположен в тыловой части месторождения относительно фронта поступления пресных подземных вод, вблизи (10 км) от его юго-западной границы. Состоит из 15 эксплуатационных скважин, оборудованных фильтрами на нижнечетвертичный и верхнеплиоценовый комплексы (рис. 31, а, б). Расход водозабора за период эксплуатации увеличился от 150 до 320 л/с (рис. 31, в). Понижения в эксплуатационных скважинах составляют 25–30 м. Понижение в скв. 403н, по которой производится расчет параметров, достигло 16 м. В основу взята расчетная кривая снижения уровня, проведенная через максимально достигнутые в пределах года понижения (рис. 31, в). Повышенные по сравнению с ней точки графика фактической кривой отражают как возможную реакцию уровня на остановку ближайших к скв. 403н эксплуатационных, так и естественную годовую амплитуду колебания уровня (1,5–2,0 м), а также неравномерность расхода водозабора в годовом разрезе. Графики прослеживания понижения во времени представлены на рис. 32, результаты расчета – в табл. 21. По приведенным расчетам можно сделать следующие выводы:

коэффициент водопроводимости оценивается достаточно убедительно, и вполне достоверной является величина KM , равная $500 \text{ м}^2/\text{сут}$. Она соответствует суммарной водопроводимости эксплуатируемых пластов, оцененных в процессе разведки в $590\text{--}660 \text{ м}^2/\text{сут}$;

коэффициент пьезопроводности из-за отсутствия сведений

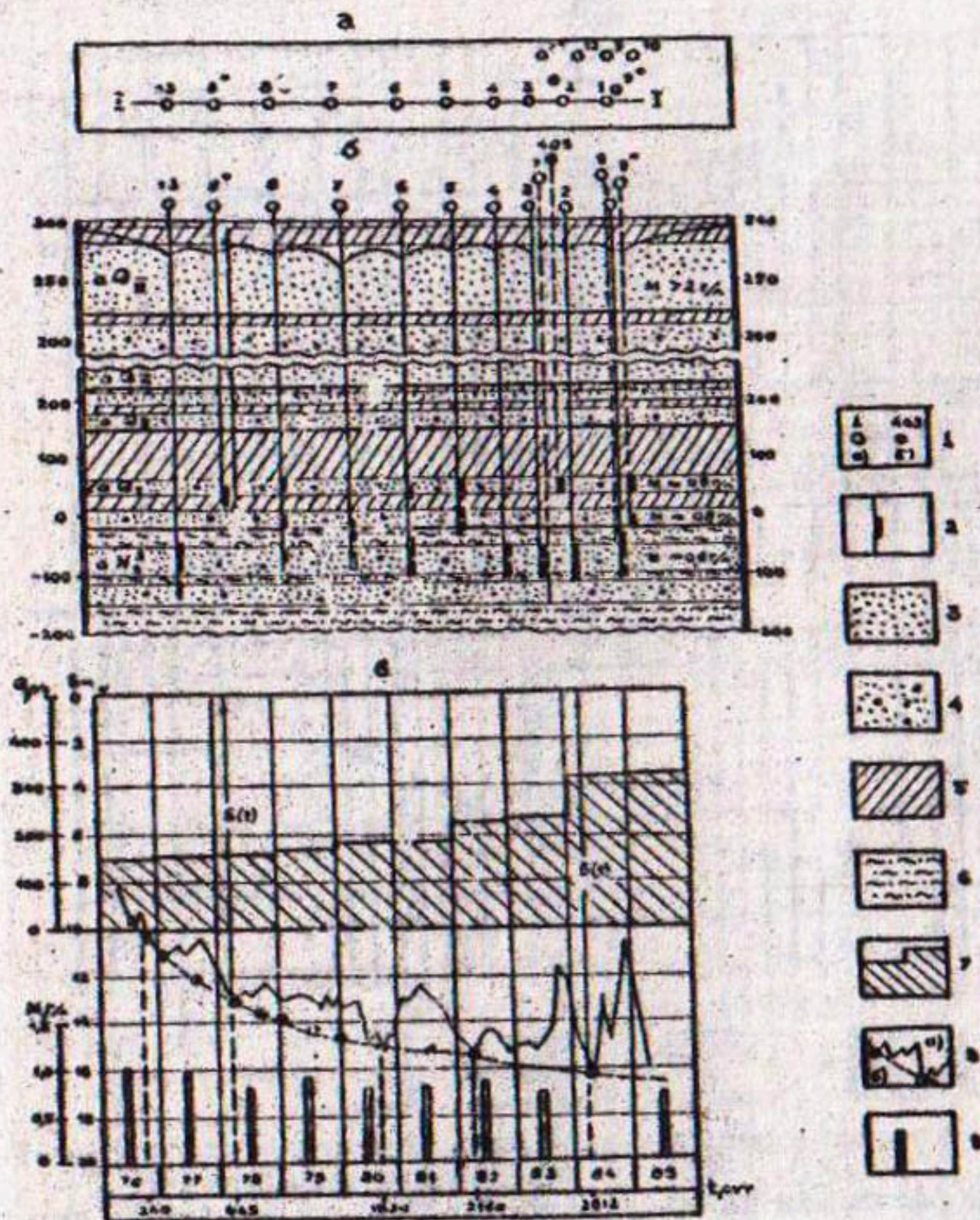


Рис. 3I. План водозабора Г (а), разрез по линии I-I (б) и графики изменения расхода понижений уровня и общей минерализации (в), по данным И.И.Цхая. 1 - скважины: эксплуатационные (а) и наблюдательная (б); 2 - положение фильтра скважин; 3 - песок; 4 - песчано-гравийно-галечные отложения; 5 - суглинок; 6 - алевролиты и глины; графики: 7 - изменения расхода водозабора, 8 - фактический (а) и расчетный (б) понижения уровня, 9 - изменения общей минерализации.

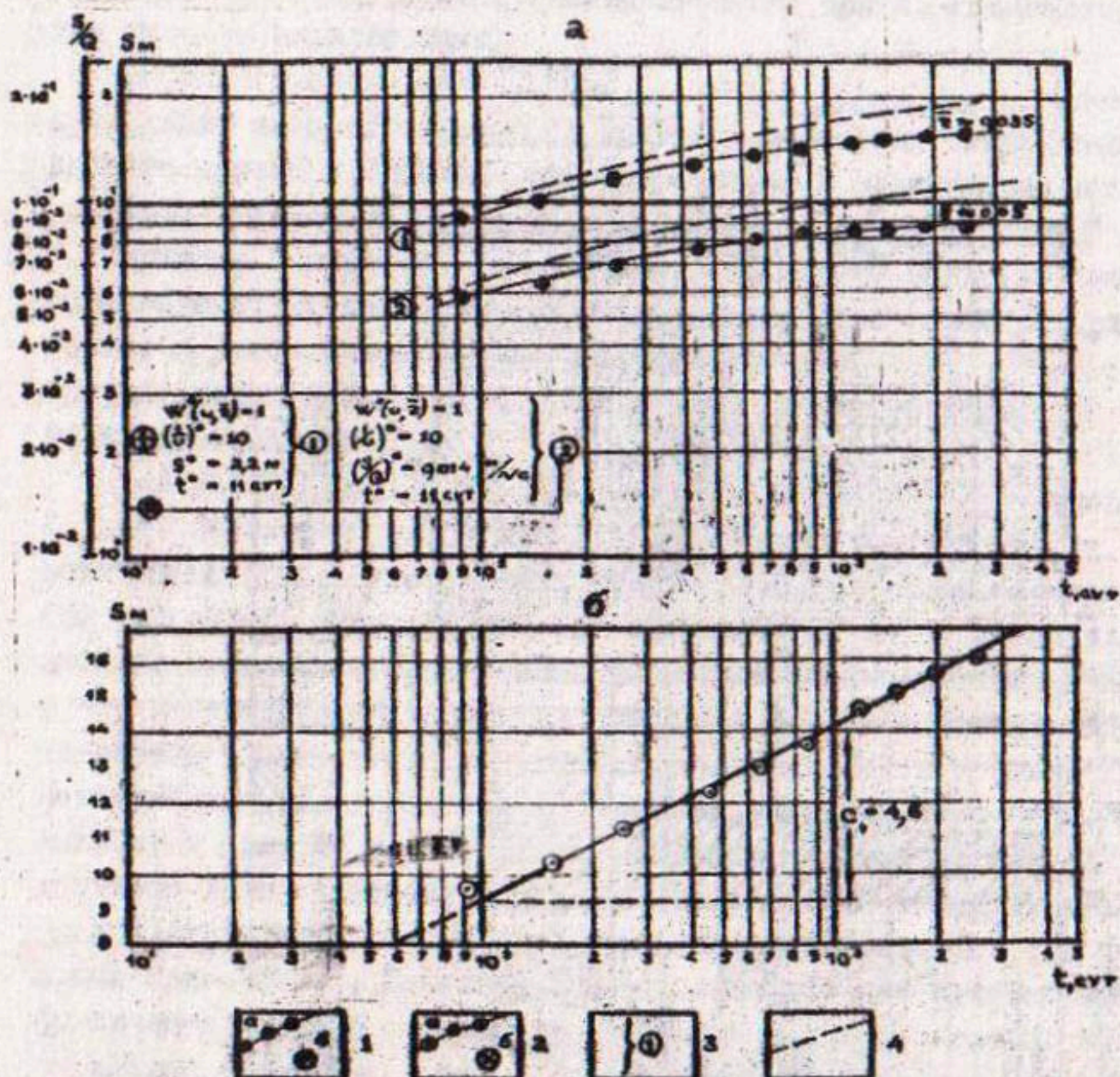


Рис. 32. Графики прослеживания зависимости по водозабору Γ $\lg S - \lg t$ (а) и $S - \lg t$ (б). Точки графика зависимости: 1 - $\lg S - \lg t$ и расчетная точка, 2 - $\lg S/q - \lg t$ и расчетная точка; 3 - координаты расчетной точки; 4 - положение эталонной кривой Тейса.

о распределении нагрузки на каждую скважину (что отражается на величине $u_{пр}$) варьирует исходя из крайних значений $u_{пр}$ от $2 \cdot 10^4$ до $2,4 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$. Последняя цифра представляется наиболее реальной, но обоснованность ее очень низкая;

анализ графиков прослеживания уровня $\lg S - \lg t$ (рис. 31, а) указывает на близость эксплуатируемого водоносного горизонта к напорному, что отражается в положении точек зависимости не-

Т а б л и ц а 21

Результаты расчета параметров по водозабору Г

Номер рас-четной сква-жины	Средний расход водоза-бора $Q_{ср}$, $\frac{м^3}{сут}$	$z_{пр}$, м	Тип графика	Ct	t , сут	$кп = \frac{0,183Q}{C(t)}$, $\frac{м^2}{сут}$	$Q = \frac{z_{пр}^2}{2,25t_0}$, $\frac{м^2}{сут}$	B , м	K' , $\frac{м}{сут}$
403н	$\frac{170}{14688}$	$\frac{295}{724}$ ж	S- lgt	4,6	I	515	$\frac{4 \cdot 10^4}{2,4 \cdot 10^5}$	-	-
Координаты расчетной точки									
$W^0 (u, \bar{r}) (H)^0 S_0 \cdot \frac{s}{Q} t_0$, $\frac{м^2}{сут}$									
403к	$\frac{170}{14688}$	$\frac{295}{724}$ ж	$lgs - lgt$	I	Ю 2,2	II	532	$\frac{2 \cdot 10^4}{1,18 \cdot 10^5}$	$\frac{8428}{20685} \frac{5 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-4}}$
403н	Переменный	$\frac{295}{724}$ ж	$lgs / Q - lgt$	I	Ю 0,014	II	491	$\frac{2 \cdot 10^4}{1,18 \cdot 10^5}$	$\frac{5900}{14438} \frac{1,12 \cdot 10^{-3}}{1,82 \cdot 10^{-4}}$

Примечание: * величина $z_{пр}$ при равномерной нагрузке на все скважины водозабора;
ж. максимально возможная величина $z_{пр}$ при основной нагрузке на дальние (относительно скв. 403н) эксплуатационные скважины.

сколько ниже эталонной кривой Тейса и характеристикой кривых перетекания $\bar{\eta} = 0,035-0,05$. Неясность в величине $\bar{\eta}_{пр}$ накладывает и здесь неопределенность на параметр перетекания B и коэффициент фильтрации разделяющего слоя K' . Наиболее реальной представляется величина $K' = 1 \cdot 10^{-4}$ м/сут, которая отражает несущественность процесса перетекания из верхних горизонтов в эксплуатируемые, что подтверждается и характером изменения минерализации подземных вод в процессе эксплуатации (рис. 31, б).

4. Месторождение пресных подземных вод в верхнемеловых отложениях Приташкентского артезианского бассейна относится к месторождениям артезианских бассейнов геосинклинального типа и характеризуется:

приуроченностью к синклинальной структуре большой площади, осложненной серией складок более низкого порядка, являющихся результатом проявления тектонической раздробленности палеозойского фундамента многочисленными разрывными нарушениями;

блоковое строение бассейна отражается в глубинах залегания водоносного комплекса (от 1000 до 2500 м), изменении мощности водоносного горизонта в соответствии со структурами, что вызывает и изменение геофильтрационных параметров пласта и химического состава подземных вод;

блоковое строение, отражаясь в величинах мощности и фильтрационных свойствах водоносного горизонта, однако, не вызвало разрыва сплошности водоносного комплекса, что позволяет рассматривать его (учитывая большую площадь распространения) как пласт неограниченного простирания;

избыточные напоры подземных вод — 150–200 м над поверхностью земли, воды термальные, температура — 50–70°, используются для бальнеологических целей и питьевого розлива.

Эксплуатация месторождения ведется в течение 35 лет. В 70-е годы, помимо 16 скважин курортных зон с общим расходом около 40 л/с, пробурено большое количество эксплуатационных, используемых для питьевого и технического водоснабжения. Общее количество эксплуатационных скважин превысило 50. Суммарный расход эксплуатации, осуществляемой на самоизливе, дости-

гал в отдельные годы 250 л/с, затем сократился до 150 л/с (рис. 33).

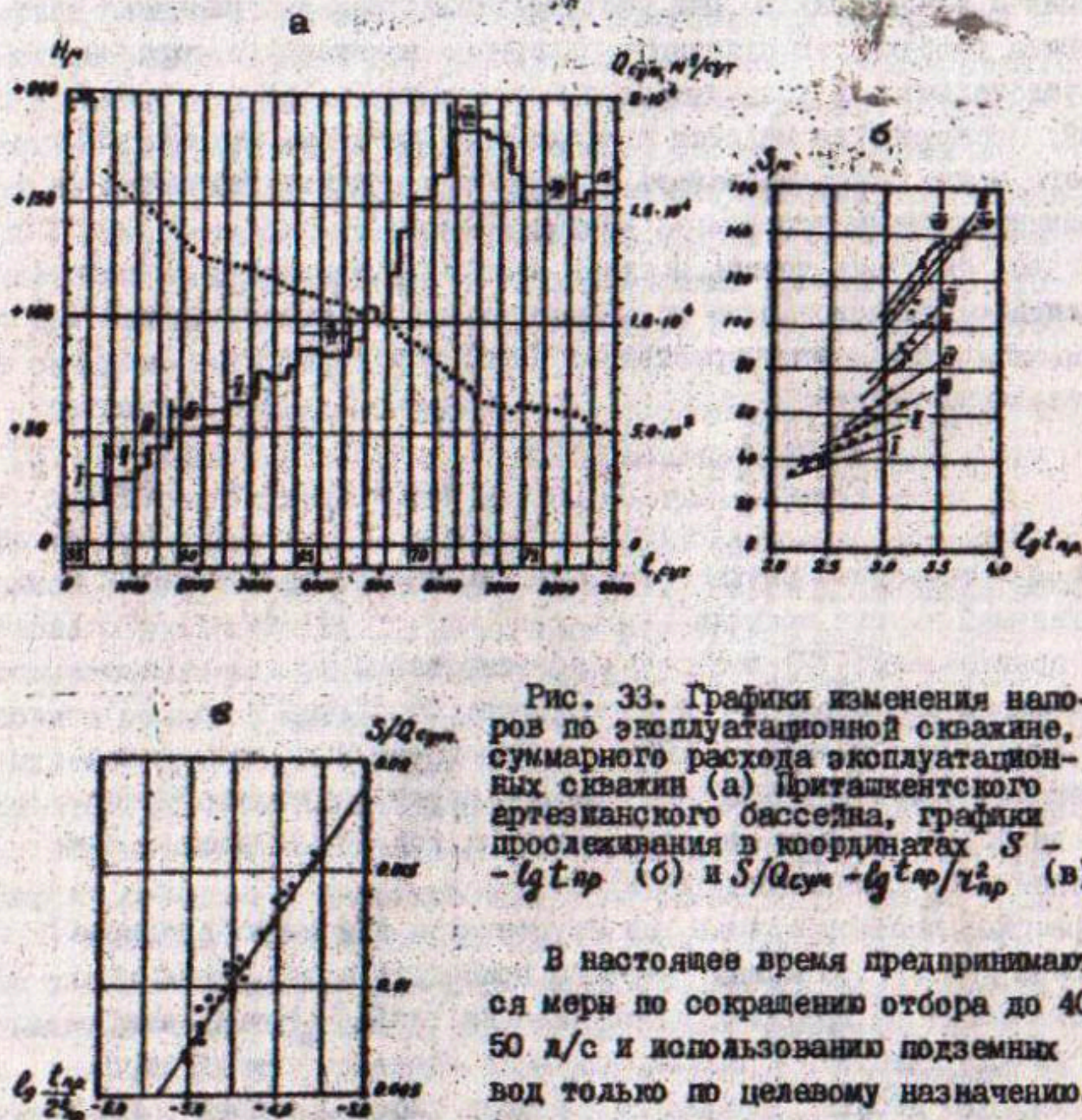


Рис. 33. Графики изменения напоров по эксплуатационной скважине, суммарного расхода эксплуатационных скважин (а) Приташкентского артезианского бассейна, графики прослеживания в координатах $S - \lg t_{np}$ (б) и $S/Q_{сум} - \lg t_{np}/r_{np}^2$ (в).

В настоящее время предпринимаются меры по сокращению отбора до 40–50 л/с и использованию подземных вод только по целевому назначению. Эксплуатация велась бессистемно по

всей площади месторождения как одиночными, так и групповыми водозаборами (2–4 скважины). Расходы значительно превышали эксплуатационные возможности горизонта, что привело к резкому падению напоров и сокращению расходов эксплуатационных скважин (рис. 33, а). Величина понижений по скважинам составила 100–150 м по сравнению с первоначально зафиксированными напорами. Наблюдательные скважины вследствие больших глубин залегания горизонта отсутствуют.

В основу расчета параметров взяты неполные сведения о расходах и напорах по эксплуатационным скважинам, времени их подключения в эксплуатацию. При расчете параметров учитывались следующие условия: эксплуатация напорного водоносного горизонта осуществляется в условиях упругого режима; пласт неограниченный; эксплуатация ведется с переменным дебитом, изменение которого можно схематизировать в виде ступенчатого графика с постоянным дебитом в пределах каждой ступени.

Процесс снижения уровня в одной из эксплуатационных скважин под влиянием разновременного подключаемых других эксплуатационных скважин описывается уравнением Тейса в логарифмическом представлении в виде:

$$S(t) = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi k m} \rho_{\text{п}} \frac{2.25 q t_{\text{пр}}}{\bar{r}_{\text{пр}}^2}, \quad (77)$$

где $Q_{\text{сум}}$ - суммарный расход всех скважин водозабора на рассматриваемый момент времени.

На зависимости (77) построены общеизвестные методы (способы) Джейкоба по определению параметров (Боревский и др., 1979; Мироненко, Шестаков, 1978). Метод временного прослеживания рекомендуется как основной для обработки результатов эксплуатации групповых водозаборов подземных вод при наличии наблюдательной сети (Плотников, 1979).

В рассматриваемом случае при ступенчатом изменении суммарного дебита водозабора можно уверенно применять метод временного прослеживания. На графиках прослеживания $S - \rho g t_{\text{пр}}$ точки зависимости должны тяготеть к прямым линиям в пределах каждой ступени суммарного дебита, отражающего работу системы скважин, характеризующейся постоянной для нее величиной $\bar{r}_{\text{пр}}$.

На графике $S/Q - \rho g t_{\text{пр}}$ также должны выделяться ступени понижения, но уже соответствующие различным значениям приведенного расстояния (при подключении новых скважин, отстоящих на значительном удалении от работающих). Причем линии на графике должны быть параллельны друг другу.

Поключительный интерес представляет обработка данных на графике $S - \rho g t_{\text{пр}} / \bar{r}_{\text{пр}}^2$, который по внешнему виду аналогичен гра-

фику комбинированного метода расчета параметров (Боревский и др., 1979), однако, по своей сути отличается от него. В первом случае анализируются изменения понижения во времени в наблюдательных скважинах, расположенных в зоне влияния откачки из одной опытной скважины, во втором – понижение в одной эксплуатационной скважине под влиянием отбора подземных вод как из этой, так и других эксплуатационных скважин, подключаемых в эксплуатацию в разное время. На графике $S - \rho g t_{np} / \tau_{np}^2$ будет проявляться ступенчатость в изменении суммарного расхода при близких значениях τ_{np} действующей в этот период системы скважин.

Построение графика зависимости в координатах $S / Q_{\text{сум}}(t) - \rho g \frac{t_{np}}{\tau_{np}^2}$ приводит к сглаживанию положения точек зависимости, отражающего ступенчатое изменение суммарного дебита, и они должны стремиться к положению, легко аппроксимируемому прямой линией. Последующее проведение прямой, определение ее углового коэффициента (C) позволяют рассчитать гидрогеологические параметры по известным зависимостям. Приведем пример расчета по одной эксплуатационной скважине, работающей на самоизливе с расходом 4,0–2,0 л/с в течение более 30 лет. Понижение напора в скважине определяется не ее расходом, а суммарным расходом всех взаимодействующих скважин (рис. 33, а). На графике временного прослеживания в координатах $S - \rho g t_{np}$ (рис. 33, б) при кажущемся, на первый взгляд, бессистемном расположении точек зависимости довольно четко выявляется ряд ступеней понижения, соответствующих различным этапам изменения расхода, возраставшего с подключением новых скважин. В пределах каждой ступени наблюдается прямолинейная зависимость $S - \rho g t_{np}$, что позволило провести расчеты параметров по каждому выделенному этапу (табл. 22).

При обработке результатов на графике $S(t) / Q_{\text{сум}}(t) - \rho g \frac{t_{np}}{\tau_{np}^2}$ (рис. 33, в) точки зависимости тяготеют к единой прямой, что позволяет рассчитать параметры. При расчетах пренебрегли влиянием термолифта и сопротивлением труб ввиду частичной их взаимокompенсации и незначительной абсолютной величины определяемых ими дополнительных понижений напора (перене метры) по

Результаты расчета гидрогеологических параметров

Тип зависимости	Этап отбора	$Q_{\text{сум.}}$ $\text{м}^3/\text{сут.}$	C	A	$KП,$ $\text{м}^2/\text{сут.}$	$\alpha,$ $\text{м}^2/\text{сут.}$	$K\text{тср.}$ $\text{м}^2/\text{сут.}$	$\alpha_{\text{ср.}}$ $\text{м}^2/\text{сут.}$
По данным эксплуатации								
$S - \rho g t_{\text{пр}}$	I	2857	11,0	9,5	30,9	$3,2 \cdot 10^5$		
	II	2997	18,0	-4,0	30,46	$8,1 \cdot 10^5$		
	III	4500	25,0	-9,5	32,96	$7,8 \cdot 10^5$		
	IV	5100	30,0	-23,0	31,1	$7,6 \cdot 10^5$	33,2	$1 \cdot 10^6$
	У	7700	43,0	-58,0	32,76	$7,6 \cdot 10^5$		
	УI	8500	48,0	-67,0	32,4	$1,23 \cdot 10^6$		
	УII	17933	91,0	-180,0	36,06	$1,3 \cdot 10^6$		
	УIII	15021	16,0	-132,0	36,16	$1,86 \cdot 10^6$		
	IX	15705	80,0	-146,0	35,92	$1,5 \cdot 10^6$		
$S Q - \rho g t_{\text{пр}} \tau^2_{\text{пр}}$	-	-	0,0061	0,0378	30,0	$7,1 \cdot 10^5$	30,0	$7,1 \cdot 10^5$
По данным разведки								
$S - \rho g t$		1382,4	3,26	25,3	33,7	$6,1 \cdot 10^5$	34,6	$6,1 \cdot 10^5$
$S - \rho g \frac{t}{T+t}$		1382,4	3,08	25,0	35,5	$6,1 \cdot 10^5$		

сравнению с общим снижением напора, достигшего 150 м. При таких понижениях ошибка в определении параметров не превышает 5% и уменьшается с их увеличением. Положительной стороной применения методов в условиях эксплуатации является возможность определения коэффициента проницаемости, что невозможно при выпусках из отдельных эксплуатационных скважин. Рассчитанные по данным эксплуатации параметры можно считать достоверными, что подтверждают и величины параметров, полученные по результатам опытных работ (табл. 22).

Аналогичные расчеты выполнены по восьми эксплуатационным скважинам, имеющим цикл режимных наблюдений, что позволило уточнить параметры, которые были положены в основу фильтрационной схемы модели, обосновавшей оптимальный режим эксплуатации месторождения и прогноз изменения напоров по эксплуатационным скважинам.

ГЛАВА 7. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ (ОФР)

Под опытно-фильтрационными работами в данном случае мы имеем в виду опытные откачки, которые входят в комплекс гидрогеологических исследований на месторождениях подземных вод, разведываемых для водоснабжения.

Опытные откачки проводятся с целью выявления водообильности водоносных толщ, горизонтов, пластов (структурно определяющих строение МПВ), для определения гидрогеологических параметров ($K, k_f, \sigma, \alpha, \mu^*, \mu, B, K_p, \Delta L$), структуры питания и, в конечном итоге, для оценки эксплуатационных запасов подземных вод (расчет соответствующей схемы водозабора) в пределах месторождений (или его участка). Величина эксплуатационных запасов прямо зависит от гидрогеологических параметров, так как эксплуатационные запасы по своей физической сути состоят из всех видов ресурсов подземных вод (естественных, антропогенных и привлекаемых) и емкостных запасов, "привязанных" через параметры и граничные условия к конкретной выбранной схеме водозабора. Поэтому правильное определение гидрогеологических пара-

метров является залогом объективной оценки эксплуатационных запасов, а проведение опытных откачек – ответственным видом полевых работ в общем комплексе исследований того или иного месторождения подземных вод. Качественное, грамотное выполнение откачек и аналогичная интерпретация их результатов являются творческим инженерным звеном исследований, которые на практике за последние годы (1985–1995 гг., введение хозрасчета, распад единой всесоюзной системы требований и т.п.), к сожалению, реализуются нередко формально, так как проведение откачек поручается слабо подготовленным техническим исполнителям. В результате огрехи дорогостоящих полевых исследований (которые невозможно восполнить на заключительном камеральном этапе) приводят к существенным ошибкам в оценке эксплуатационных запасов, т.е. в решении поставленной той или иной народнохозяйственной задачи.

В настоящем разделе не представляется возможным охарактеризовать даже основной ~~накопленный~~ имеющийся багаж по проведению ОФР и их интерпретации (для этого требуется отдельная подготовка специального, значительного по объему, методического руководства). Однако обобщение многолетнего опыта производственных подразделений (экспедиций) ГТГ "Узбекгидрогеология" позволяет отметить ряд необходимых положений, недоучет которых может привести (и, к сожалению, приводит) к снижению качества и эффективности ОФР. Имеются в виду, прежде всего, кустовые откачки, при которых для расчетов параметров используются наблюдательные скважины.

I. Важное значение для целенаправленной откачки и ее обработки имеет четкое инженерное представление о расчетной гидродинамической схеме опробуемой водоносной толщи (пласта) уже на стадии проектирования работ (т.е. схема должна быть составлена и обозначена в проекте). Возможные расчетные схемы приведены в главе 5. Для их подтверждения в конкретном опыте необходима рациональная схема куста скважин, рекомендации по которой, а также конструкции опытной скважины и пьезометров, изложенные в работе (Саидмурадов, Нагевич, 1989 г.), могут быть приняты за основу, но во избежание повторений здесь не приводятся. Отметим только, что при обосновании схемы следует учитывать динамичность

подземных вод в пласте, граничные условия, неоднородность пластов в разрезе, наличие дополнительных источников питания.

2. Для объективной (достоверной) оценки гидрогеологических параметров в главах 4 и 5 настоящей работы подробно рассмотрены и охарактеризованы гидродинамические особенности изменения уровня в ходе откачек (в соответствующих координатах) для всех указанных четырех схем. Вследствие водоотбора из опытной скважины в сфере ее гидродинамического воздействия на водоносный горизонт, в нем формируются понижения (воронки депрессии), фиксируемые в наблюдательных скважинах. Эти понижения в виде соответствующих построенных графиков характеризуют упругий, ложностационарный и упругопластический или гравитационный режимы водоотдачи пласта в процессе откачки. Поэтому достоверная фиксация понижений в опытной и наблюдательных скважинах, а также своевременное (в ходе откачки) построение графиков в необходимых поллогарифмических (или логарифмических) координатах являются важнейшим требованием для успешной оценки гидрогеологических параметров. Выбирая расчетные интервалы на графиках, необходимо пользоваться "гидрогеофильтрационными па-летками" П.П.Нагевича, которые представляют собой совокупность теоретических кривых, полученных на основе решений Тейса, Хантуша-Джейкоба, Боултона.

Таким образом, осознанная инженерная обработка откачки в ходе ее проведения должна стать нормой и составной частью полевой документации (что пока не выполняется на практике).

3. Обобщение опыта исследований на МПВ Узбекистана свидетельствует, что для II, III и IV гидродинамических схем через 1-2 сут радиус квазистационарной зоны воздействия откачки может достигать 250-300 м. Поэтому во всех случаях необходима контрольная специальная наблюдательная скважина, характеризующая "естественный" режим изменения уровня подземных вод за пределами воронки депрессии на расстоянии 250-350 м от опытной. Наблюдения в этой скважине, как и по всей сети, должны начинаться за двое суток до начала откачки с частотой замеров 3-4 раза в сутки, а затем продолжаться во время откачки и восстановления с частотой один замер через 1-2 ч и завершаться через двое

суток после окончания периода восстановления уровня в опытной и наблюдательной скважинах опытного куста. На приречных участках обязательны наблюдения за уровнем поверхностных вод в водотоках (речные посты), водопроявлениях, зонах выклинивания с частотой замеров, равной замерам в скважинах опытного куста (один замер через каждые 1-2 ч). Все точки замеров немедленно наносятся на первичный полевой график, составляемый отдельно для каждой скважины и речных постов. Один-два раза в сутки осуществляется контрольный замер по всем пунктам наблюдений, о чем делается соответствующая запись в первичном полевом журнале откачки; один раз в сутки - контрольный замер глубины наблюдательных скважин (чтобы своевременно обнаружить процессы их "заиления", если таковые проявятся по тем или иным причинам).

4. Продолжительность откачек для определения гидрогеологических параметров специально обосновывается проектом работ с иллюстрацией по объекту-аналогу, так как изученность МПВ Узбекистана вполне позволяет это сделать. Всегда следует помнить, что в настоящее время опытная откачка является дорогостоящим видом работ. Обобщение имеющихся данных показывает, что для получения убедительных результатов продолжительность собственно откачки должна составлять 4-5 сут. Дополнительно к этому требуются наблюдения за восстановлением уровня подземных вод в опытной и наблюдательных скважинах в течение 1,5-2 сут. Для напорных "изолированных" пластов (схема I) время убедительного выхода фактических понижений на соответствующие им теоретические зависимости составляет 5-6 сут.

Частота замеров уровня воды в скважинах в процессе откачки должна проводиться по следующей схеме: первые 5 мин. - через 1 мин., затем 10 мин. - через 2 мин., далее 30 мин. - через 5 мин., последующий 1 ч - через 10 мин., затем 3 ч - через 20 мин., 2 ч - через 30 мин., далее в течение оставшегося периода откачки - через 1-2 ч. Наблюдения за восстановлением уровня в скважинах ведутся в той же последовательности, т.е. первые 5 мин. - через 1 мин., 10 мин. - через 2 мин. и т.д.

5. Принципиальное значение имеет убедительная абсолютная величина "срезок" (понижений) в наблюдательных скважинах. Опыт откачек свидетельствует, что достоверные гидрогеологические па-

параметры определяются при "срезках" в удаленных наблюдательных скважинах не менее 0,5–0,6 м. Средства откачки (насосное оборудование, эрлифтные установки и т.п.) должны подбираться (исходя из известной удельной водообильности пластов) с таким расчетом, чтобы обеспечить указанные значения понижений.

6. Аппаратура для замеров уровня и дебита подбирается с учетом имеющихся приборов, конструкций опытной и наблюдательной скважин, глубины до уровня воды и величины ожидаемого дебита. Допускается применение приборов, обеспечивающих точность замера уровня до 1 см и дебита – до 2–3%. Очередность замеров уровней воды в скважинах куста должна быть постоянной. Измерение расхода откачиваемой воды производится в те же сроки, что и замер уровней воды в скважинах. Откачиваемая вода должна отводиться по водоводам на расстояние, исключающее фильтрацию и повторную "перекачку" воды.

7. Участок откачки должен иметь топографическое обеспечение (особенно при работе в приречных зонах); скважины и рейки закрепляются нивелированием вдоль наблюдательных лучей.

8. Подробный перечень необходимых мероприятий на различных стадиях опытного опробования (предполевая, полевая, камеральная), обеспечивающих полное решение поставленной задачи, приведен в главе 5. Подчеркнем особую важность гидрогеологического обследования перед началом и в процессе опыта, которое должно зафиксировать изменение гидрогеологических условий в области влияния откачки и уточнить расчетную гидродинамическую схему. Обязательным оно представляется при откачках из безнапорных пластов.

9. Конструкции скважин должны обеспечивать отсутствие перетекания вдоль обсадных колонн. Наличие такого перетекания приводит к искажениям и браку результатов откачки, что исключает возможность получения убедительных и однозначных параметров. Перечисленный минимум требований не следует рассматривать как исчерпывающий. Однако анализ опыта проведения откачек свидетельствует, что наиболее часто огрехи полевых ОФР происходят по указанным причинам.

ГЛАВА 8. ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ СТРУКТУРА ОСНОВНЫХ ТИПОВ МПВ УЗБЕКИСТАНА

Широкие речные долины (р.Чирчик)

Характеристика МПВ. Чирчикское месторождение подземных вод (рис. 34) приурочено к аллювиальным галечникам четвертичного возраста и только в нижней части долины — к верхнеэоценовым аллювиальным галечникам и пескам. Мощность водоносных отложений возрастает от верховьев долины (г.Газалкент) до р.Сырдарьи. В верхней части водоносные галечники с песчано-гравийным заполнителем, представляющие основной продуктивный горизонт МПВ, относятся к современным и верхнечетвертичным отложениям и подстилаются средне — нижнечетвертичными плотными, крепкими конгломератами на песчано-известковистом цементе. Общая мощность не превышает 20 м. В средней и нижней частях долины в верхней толще водоносных галечников с песчано-гравийным заполнителем появляются маломощные прослои конгломератов, и мощность горизонта увеличивается до 50-80 м. Подстилающие конгломераты (Оп) расщепляются на отдельные слои и постепенно выклиниваются с замещением на галечники с песчано-суглинистым заполнителем. В нижней части в разрезе водоносного горизонта увеличиваются количество отдельных прослоев и линз суглинков и содержание глинистых частей в заполнителе.

Питание продуктивного водоносного горизонта осуществляется за счет естественных и антропогенных ресурсов (гидрогеологические, климатические, ирригационные), которые способствуют формированию сложившихся запасов МПВ, проявляющихся в виде существенного объема емкостных запасов, естественного потока подземных вод, разгрузки в дренажи, коллекторы и испарения с поверхности зеркала подземных вод.

Особенности проявления снижения уровня при откачках и их интерпретации. Графики прослеживания понижения S во времени lgt , построенные по данным опытно-фильтрационных работ по более чем 150 разведочным скважинам для месторождения долины р.Чирчик, характерны для безнапорного водоносного горизонта (схема III, рис. 19).

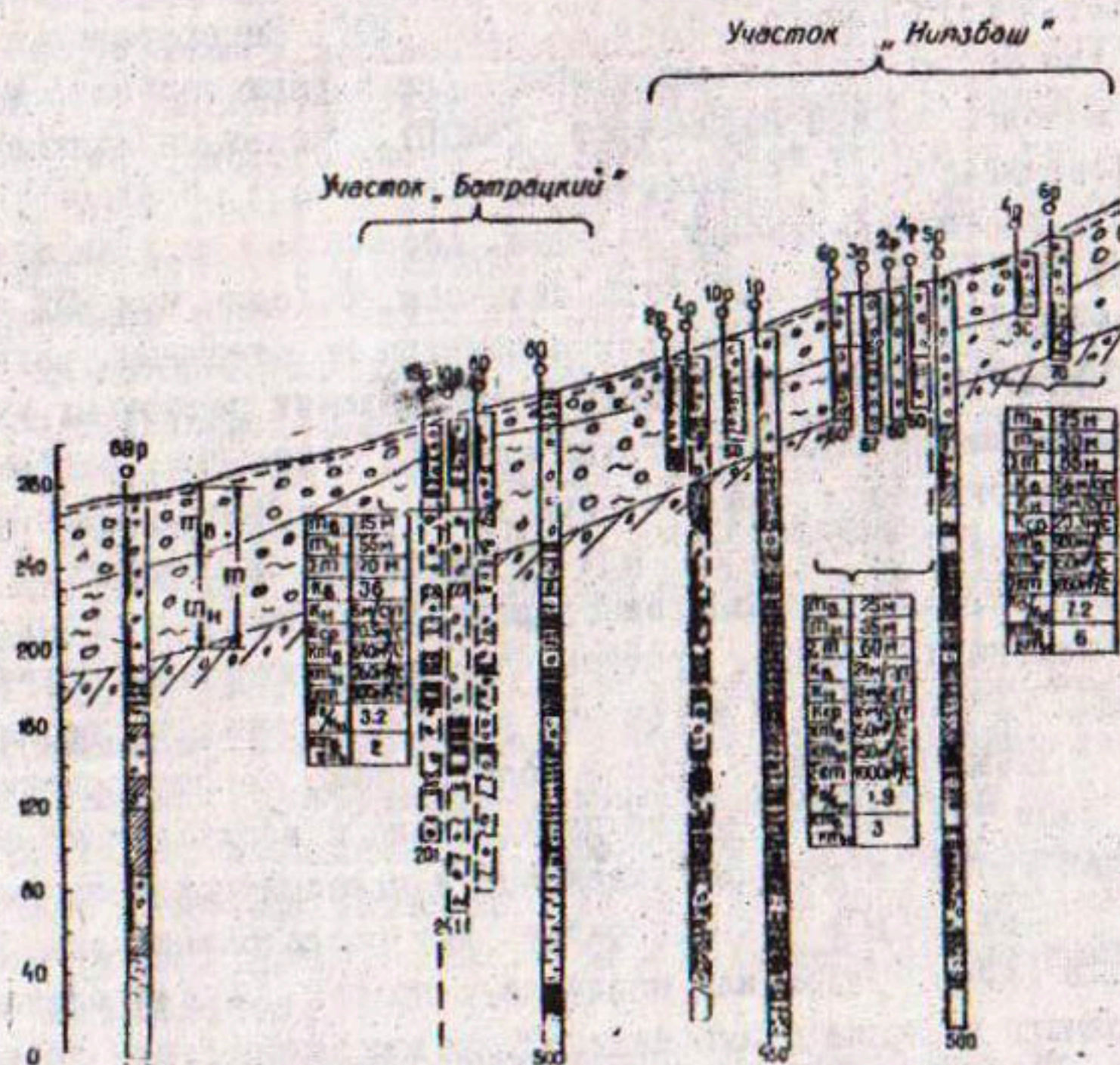
По скважинам, находящимся около реки, проявляются четыре этапа: упругий, ложностационарный, гравитационный и стационарный режимы. Как правило, эти этапы хорошо выражены по ближайшим к опытной наблюдательным скважинам, менее четко проявляется первый этап по удаленным от опытной скважины пьезометрам. По кустам, где в ачальный период не проводились учащенные замеры откачки и восстановления, пропущен первый этап упругого режима, и графики прослеживания отражают процесс снижения уровня лишь в пределах последующих трех этапов.

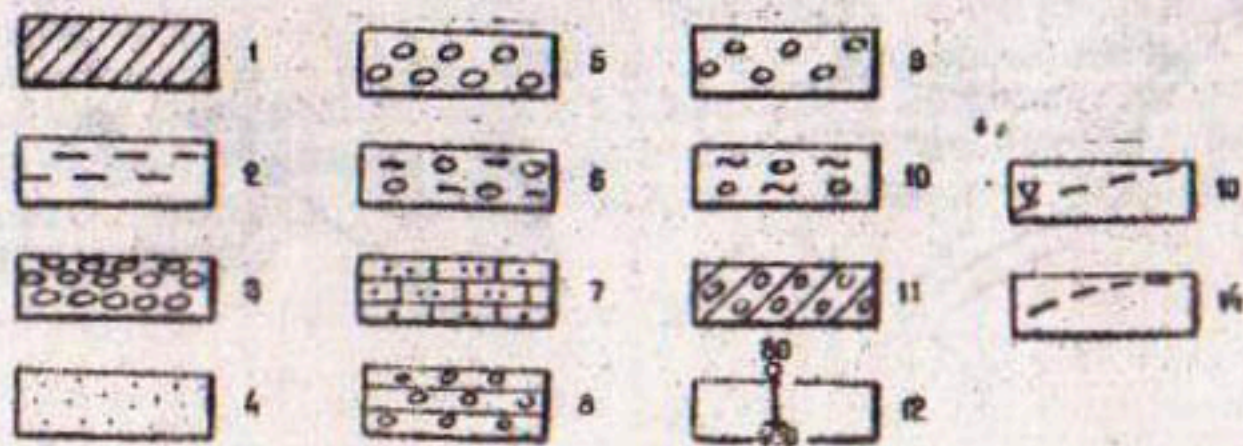
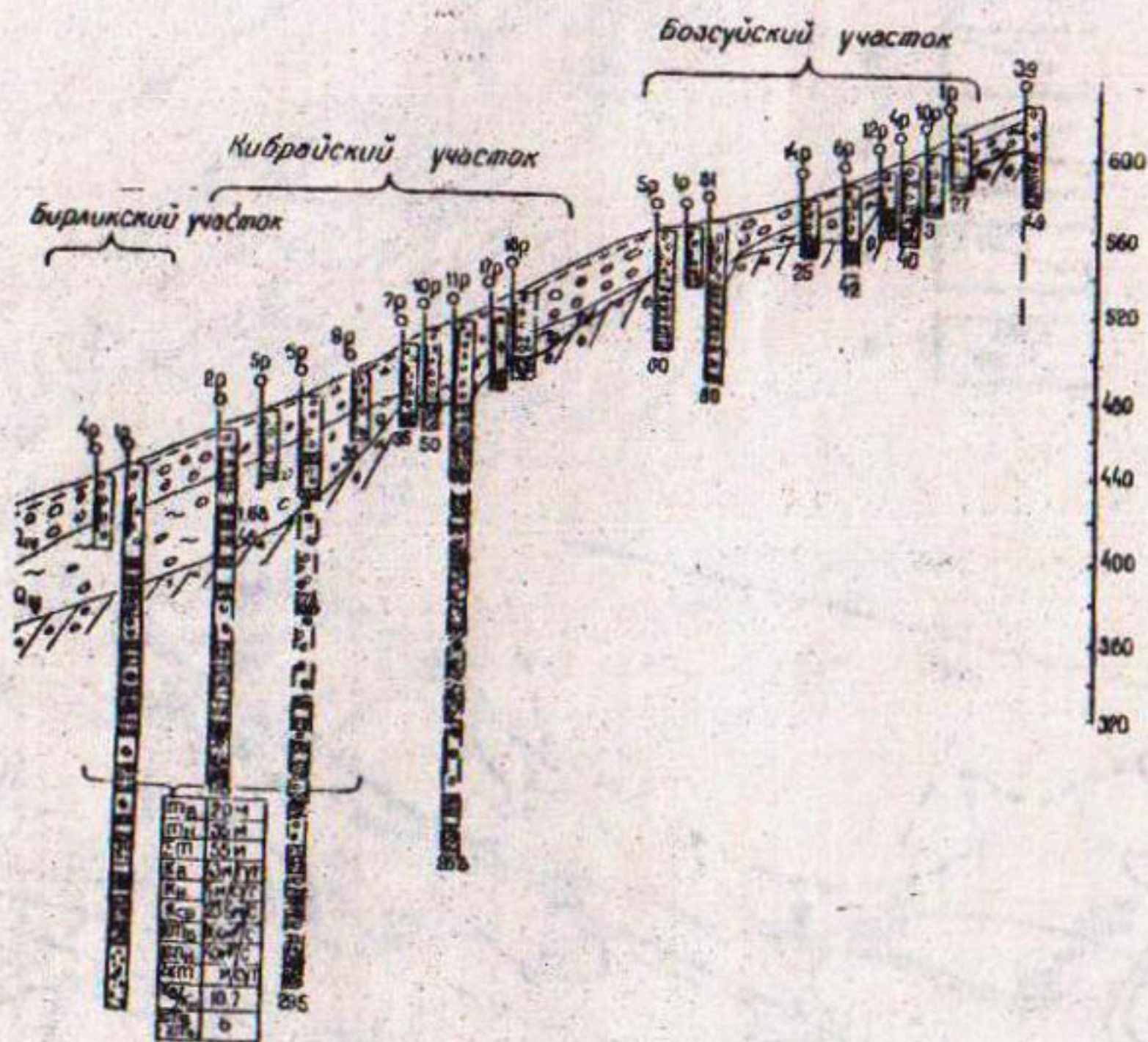
В целом типовые графики приречных скважин свидетельствуют о полной идентичности опробуемого водоносного горизонта с границей постоянного напора (схема IV, рис. 20). Интерпретация результатов ОФР производилась с применением рационального комплекса методов оценки параметров (РКМОП). Расчетами подтверждена эффективность его использования совместно с обобщающим методом гидрогеофильтрационных палеток, обоснованного в настоящей работе. Убедительные параметры получены по более чем 80% опытных откачек. Менее убедительны параметры по откачкам, когда при диагностике индикаторных кривых и определении расчетных участков возникают определенные трудности. По отдельным, особенно приречным, скважинам, на конечных участках кривых (ориентировочно со времени $2 \cdot 10^3$ и $4 \cdot 10^3$ мин.), выходящих на четвертый этап стабилизации, наблюдаются волнообразные, а иногда и скачкообразные изменения уровня. Причины подобных отклонений могут быть различны, но основная — изменение условий питания на границах:

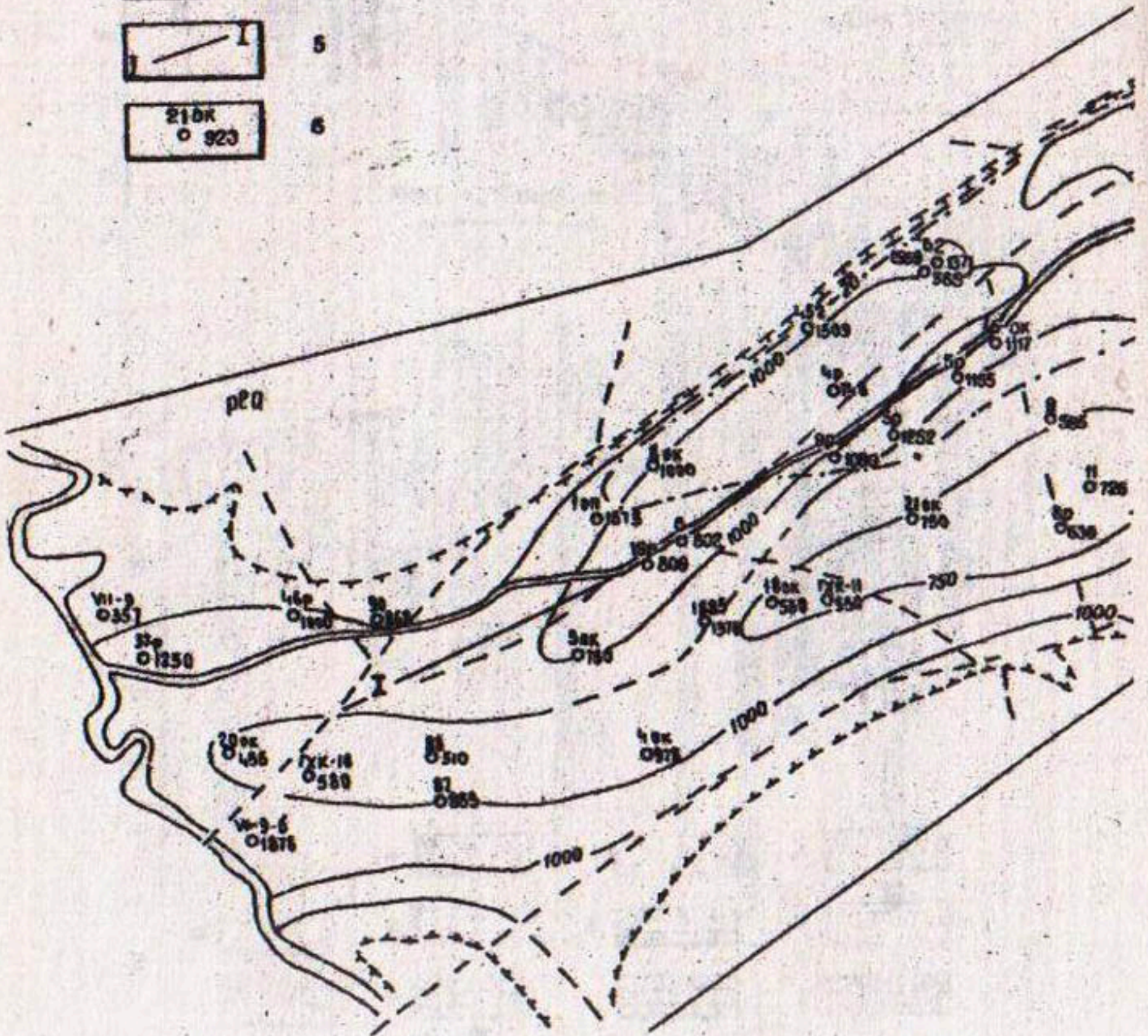
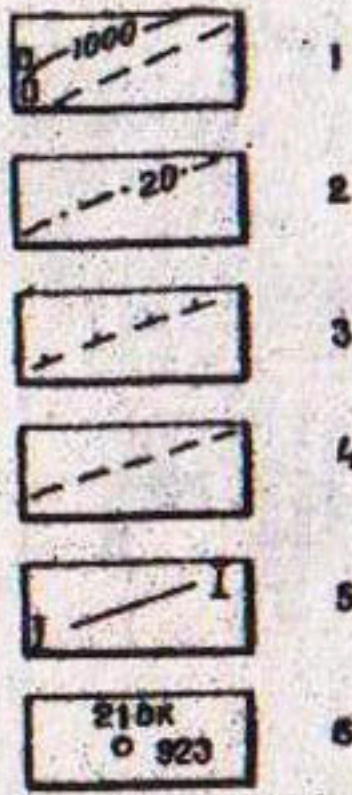
при подъеме или спаде уровня воды в реке, хорошо подтверждаемых в ходе тех опытов, когда параллельно с наблюдениями за изменениями уровня в опытных скважинах и пьезометрах проводились замеры уровня воды в реке по рейке; при расположении опытных скважин в пойме, рядом или между двух протоков — это влияние двух границ, сначала более близкой, затем дальней или прекращение пропуска воды по одной из речных протоков.

Встречаются примеры проведения откачек сначала в условиях питания, а затем — его отсутствия, когда происходит отрыв уровня подземных вод от уровня воды в протоке, или примеры осушения в ходе снижения уровня при откачке верхней, наиболее проницаемой, части разреза.

Рис. 34. Геофильтрационный разрез МПВ долины р. Чирчик.
 1 - суглинки; 2 - алевролиты; 3 - конгломераты; 4 - пески;
 5 - галечники; 6 - галечник с суглинистым заполнителем; 7 -
 песчаники; 8 - гравелит. Фильтрационная характеристика от-
 ложений, м/сут: 9 - 20-100; 10 - 5-10; 11 - 1-5. 12 - сква-
 жина разведочная: вверху - номер скважины, внизу - глу-
 бина скважины, м. 13 - положение уровня подземных
 вод от п/з, м; 14 - линии зон тектонических нарушений.







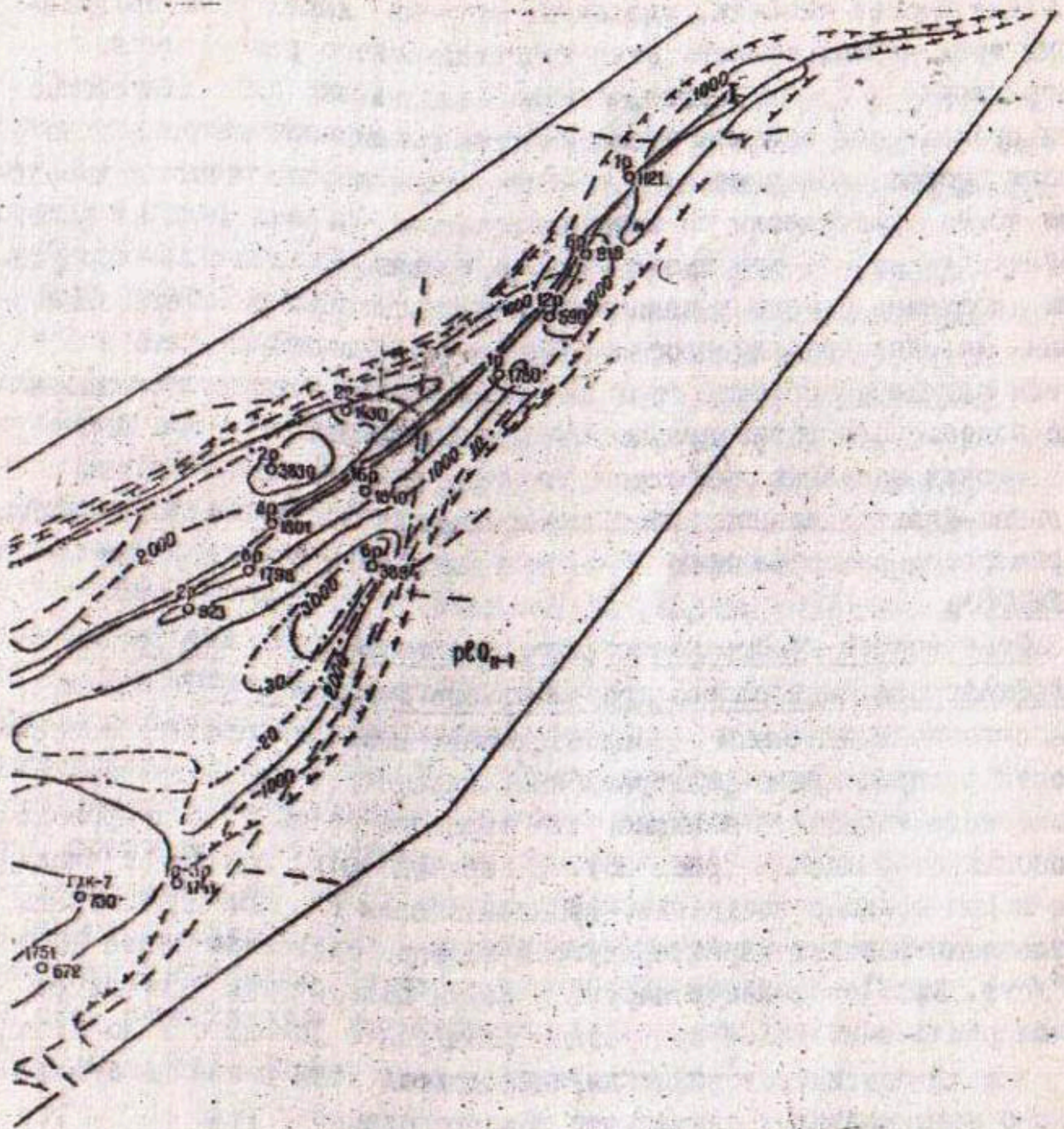


Рис. 35. Схема водопроводимости МПВ долины р. Чирчик.
 1 - изолинии водопроводимости, м²/сут: а - установленные, б - предполагаемые; 2 - изолинии мощности верхнего высокопроницаемого слоя; 3 - граница МПВ; 4 - предполагаемые линии тектонических нарушений (по данным ПГО "Ташкентгеология"); 5 - линия геофильтрационного разреза; 6 - скважины, опробованные откачками: вверху - номер скважины; справа - коэффициент водопроводимости.

Для кустов скважин, удаленных от реки, характерны проявления трех первых этапов. Этап гравитационного режима имеет стремление к стабилизации, однако, в пределах продолжительности проведенных откачек выход на этап стационарного режима по всем кустам наблюдается не всегда. Этапы прослеживаются довольно четко практически по всем пьезометрам. Первый этап не фиксируется только по тем кустам, где в процессе опыта были пропущены учащенные замеры в начальный период откачки и восстановления. Типовые графики прослеживания свидетельствуют, что и в этом случае опробуемый горизонт соответствует схеме безнапорного водоносного горизонта, неограниченного в плане (схема III, рис. 19).

Расчет основных гидрогеологических параметров по данным опытно-фильтрационных работ также показал высокую эффективность применения рационального комплекса методов оценки параметров (РКИДП).

Особенности пространственного распространения параметров и геофильтрационный разрез продуктивного горизонта МПВ. Анализ рассчитанных значений водопроводимости позволил выявить особенности распределения фильтрационных параметров продуктивного водоносного горизонта в плане, что отражено на карте водопроводимости месторождения (рис. 36). В верхней части долины отмечаются и далее, вниз по долине, прослеживаются два палеорукава реки, отложения которых характеризуются водопроводимостью более $1000 \text{ м}^2/\text{сут}$. Этот блок контролируется двумя поперечными тектоническими разломами. Далее при резком расширении долины с 7 до 24 км, в средней части месторождения, наблюдаются зоны развития отложений с максимальными значениями водопроводимости — до $4000 \text{ м}^2/\text{сут}$ как в пределах левобережья, так и правобережья. Граница их распространения в плане также фиксируется поперечным тектоническим разломом. Ниже створа Сергели ширина развития водоносного горизонта постепенно уменьшается до 15–16 км. Здесь, в основном, преобладают отложения с водопроводимостью менее $1000 \text{ м}^2/\text{сут}$ (порядка $500\text{--}700 \text{ м}^2/\text{сут}$), и прослеживается несколько палеорукавов более проницаемых отложений. Современное русло р. Чирчик контролирует полосу развития отложений с водопроводимостью $1000\text{--}1800 \text{ м}^2/\text{сут}$.

Таким образом, общей закономерностью для долины р. Чирчик является увеличение проницаемости сверху вниз по долине с максимумом в ее средней части, а затем – уменьшение проницаемости в нижней части долины.

Предпосылка о вертикальной изменчивости фильтрационных свойств и зависимости проницаемости аллювиальных отложений от времени их формирования хорошо подтверждается данными опытных откачек и определений коэффициентов фильтрации аллювиальных отложений разного возраста, что отражено на продольном геофильтрационном разрезе долины р. Чирчик (рис. 35). Так нижне-средне-четвертичные отложения характеризуются K_f от 1 до 5 м/сут, верхне-четвертично-современные – от 5–10 до 20–100 м/сут.

Детально анализируя литологические разрезы разведочных скважин, вскрывающих отложения продуктивного горизонта МПВ в увязке с электрическими характеристиками ρ_k и изменениями водообильности отложений по глубине, находим, что он может быть подразделен на два слоя. На графиках распределения значений удельных дебитов и глубины расположения фильтров опытных скважин, построенных по каждому из участков разведки в пределах месторождения (рис. 36), хорошо отбивается верхний слой галечников мощностью 15–25 м, характеризующийся высокими фильтрационными свойствами. Удельные дебиты колеблются от 15 до 25 л/с, рассчитанные коэффициенты фильтрации верхнего слоя от 20 до 45 м/сут. Нижний слой верхне-четвертичных галечников мощ-



Рис. 36. Интегральный график изменения водообильности отложений МПВ долины р. Чирчик с глубиной: У – Уртауул; А₆ – Алмазар (Батрацкий); А_Н – Алмазар (Ниязбаши); Ч – Чигурик; К – Киберай; С – Сергели; Б – Бирлик.

ностью 30–40 м, в разрезе которого появляются прослой конгломератов, менее проницаем. Судя по расходам скважин, оборудованных на данные отложения и не превышающих 10 л/с, коэффициенты фильтрации галечников варьируют от 5 до 10 м/сут.

Соотношение водопроницаемости верхнего и нижнего слоев составляет 5:1 или 6:1 в средней части долины, уменьшаясь к нижней части МПВ до 2:1 или 3:1. Таким образом, по МПВ долины р. Чирчик можно сделать следующие выводы.

1. Геофильтрационный разрез продуктивного водоносного горизонта является двухслойным с максимальными коэффициентами водопроницаемости верхнего высокопроницаемого слоя (1000–1500 м²/сут) и меньшими нижнего (200–500 м²/сут). Водоупором являются практически непроницаемые конгломераты на известковистом цементе и слабопроницаемые суглинки (в нижней части долины). Эта макронеоднородность пласта в разрезе должна учитываться при оценке эксплуатационных запасов.

2. Особенности пространственного распределения геофильтрационных параметров подтверждают возможные общие закономерности формирования фильтрационных свойств водоносных пластов, определяемых неотектоникой района в период образования отложений и обусловленных ею фазы динамического развития долины. Они отражаются в перстративном облике отложений верхнего слоя (фаза равновесия), перстративно-контративном нижнего слоя продуктивного пласта (равновесно-аккумулятивная фаза) и преимущественно в контративном облике подстилающих продуктивный пласт отложений относительного водоупора (преобладание аккумулятивной фазы).

Узкие речные долины (р. Санзар)

Характеристика МПВ. Долина р. Санзар на участке пропала палеозойских образований – своеобразный гидрогеологический район, в пределах которого формируются грунтовые воды, тесно связанные с поверхностными. Водонасыщенными отложениями здесь являются аллювиально-пролювиальные галечники ташкентского и голодно-стелского комплексов, а непосредственно в русле р. Санзар – сов-

ременные галечники и пески. Мощность галечников, образующих единый гидравлически связанный водоносный горизонт, изменяется от 18 до 40 м. С поверхности толща перекрыта суглинками мощностью от 1 до 10 м. Подстилаются галечники отложениями неогена (частично), а в основном залегают непосредственно на Pz . Воды, приуроченные к отложениям Q_{III} и Q_{II} , накапливаются за счет речного стока, а также потоков, сбрасывающих дождевые и талые воды с горных склонов и, частично, за счет инфильтрации атмосферных осадков. Кроме того, в питании участвуют трещинные воды, выходящие в нижней части склонов долины р.Санзар. Расходятся подземные воды, в основном, на подземный отток в сторону конуса выноса и, частично, на пополнение поверхностного стока р.Санзар (участки сужения долины). Водообильность галечников характеризуется удельными дебитами от 1 до 34 л/с. Водоносный горизонт распространяется в ширину от 0,3 до 2 км. Уровень воды на глубине 1,6–28,2 м.

Особенности проявления сущности уровня при откачках и их интерпретации. Проанализированы все одиночные, кустовые и групповые откачки, проведенные в долине с 1957 по 1986 г. Построенные в координатах $S - \lg t$ индикаторные графики хода откачек показывают следующее.

Выделяемые этапы снижения уровня характеризуют тип водоносного горизонта как безнапорный. До Тамерлановых ворот р.Санзар играет роль границы I рода, ниже Тамерлановых ворот – II рода. I этап упругого режима на всех графиках прослеживания либо отсутствует, либо проявляется очень слабо. Его продолжительность – от первых до 40 мин. Наиболее четко выделяются: второй – ложностационарный и третий – гравитационный этапы. На этих этапах по данным кустовых откачек применен рациональный комплекс методов оценки параметров, позволяющий ограничить разброс цифр и выйти на близкие к достоверным величины параметров опробуемой водоносной толщи. Продолжительность третьего этапа – до $2 \cdot 10^3$ мин. По отдельным скважинам при большей продолжительности опытных откачек наблюдается выход понижений на четвертый этап стабилизации уровня. Эти участки трудно диагностируются, так как кривые имеют волнообразный характер и

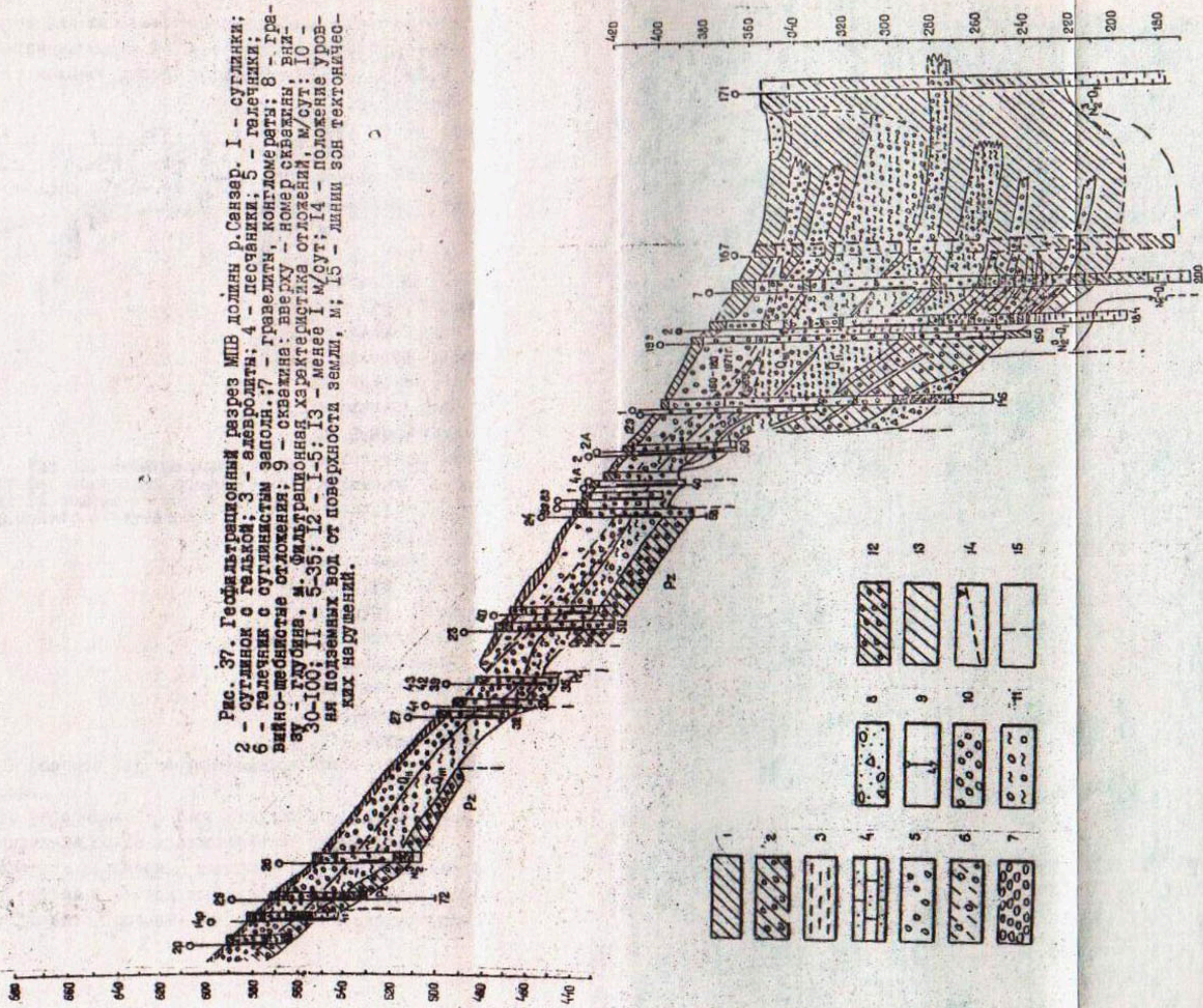
связи со спадом и подъемом уровня воды в р.Санзар.

По данным понижений в одиночных скважинах при установившемся режиме фильтрации выполнены расчеты по формуле Дюпюи, а также методом временного прослеживания. Таким образом, были интерпретированы все данные ОФР, что позволило определить фильтрационные показатели водоносной толщи четвертичных отложений долины р.Санзар и рассмотреть особенности распределения фильтрационных параметров в разрезе.

Особенности пространственного распределения параметров и геофильтрационный разрез продуктивного горизонта МПВ. По профилю, расположенному вдоль долины р.Санзар (рис. 37), установлены закономерности изменения фильтрационных свойств отложений по глубине. Одним из косвенных признаков, позволяющих провести условную границу между хорошо и плохо проницаемыми отложениями, является литолого-фашиальный фактор. Галечники современного и верхнечетвертичного возраста, к которым приурочен поток грунтовых вод, имеют в основном песчано-гравийный заполнитель, а гравийно-суглинистый заполнитель встречается в нижней части разреза. Мощность водоносного слоя в вертикальном разрезе нарушается прослоями суглинков (1-3 м), которые проявляются преимущественно с глубины 15-17 м. Эта выявленная закономерность подтверждается анализом значений электрических сопротивлений пород (по данным каротажа). В верхнем слое галечников они изменяются от 100 до 180 Ом·м, в нижнем - от 210 до 250 (иногда до 400 Ом·м), а подстилающих их конгломератах (ориентировочно средне- и нижнечетвертичного возраста) составляют 800 Ом·м.

Относительную водообильность отложений в пределах МПВ характеризует зависимость удельных дебитов скважин с глубиной (рис. 38). На графике приведены и показатели водообильности отложений в пределах верхней части долины (до с.Галлаарал). Зависимость отражает фильтрационную неоднородность разреза аллювиально-пролювиальных отложений, подтвержденную и рассчитанными значениями параметров. Так, верхняя часть разреза до глубины 20 м характеризуется самыми высокими коэффициентами фильтрации (от 30 до 100 м/сут) в нижележащих отложениях до глубины 30-40 м K_f изменяется от 5 до 30 м/сут. Относительно сла-

Рис. 37. Геофильтрационный разрез МПВ долины р. Санзер. I - суглинки; 2 - суглинок с галькой; 3 - алевролиты; 4 - песчаники; 5 - галечники; 6 - галечник с суглинистым заполн.; 7 - гравелиты, конгломераты; 8 - гра-вино-песчаные отложения; 9 - скважина: вверху - номер скважины, вни-зу - глубина, м. Фильтрационная характеристика отложений, м/сут: 10 - 30-100; 11 - 5-35; 12 - 1-5; 13 - менее 1 м/сут; 14 - положение уров-ня подземных вод от поверхности земли, м; 15 - линии зон тектоничес-ких нарушений.



бопроицаемые отложения ташкентского комплекса имеют средние коэффициенты фильтрации менее 1-5 м/сут. Отношение водопроницаемости верхнего и нижнего слоев составляет от 5:1 до 3:1.

Таким образом, по МПВ долины р. Санзар можно сделать следующие выводы:

1. Геофильтрационный разрез продуктивного водоносного горизонта является двухслойным с максимальными коэффициентами водопроницаемости верхнего, высокопроницаемого, слоя (800-1000 м²/сут) и меньшими для нижнего (200-400 м²/сут). Водоупором являются слабопроницаемые конгломераты на глинистом цементе. Макронеоднородность пласта в разрезе должна учитываться при оценке эксплуатационных запасов.

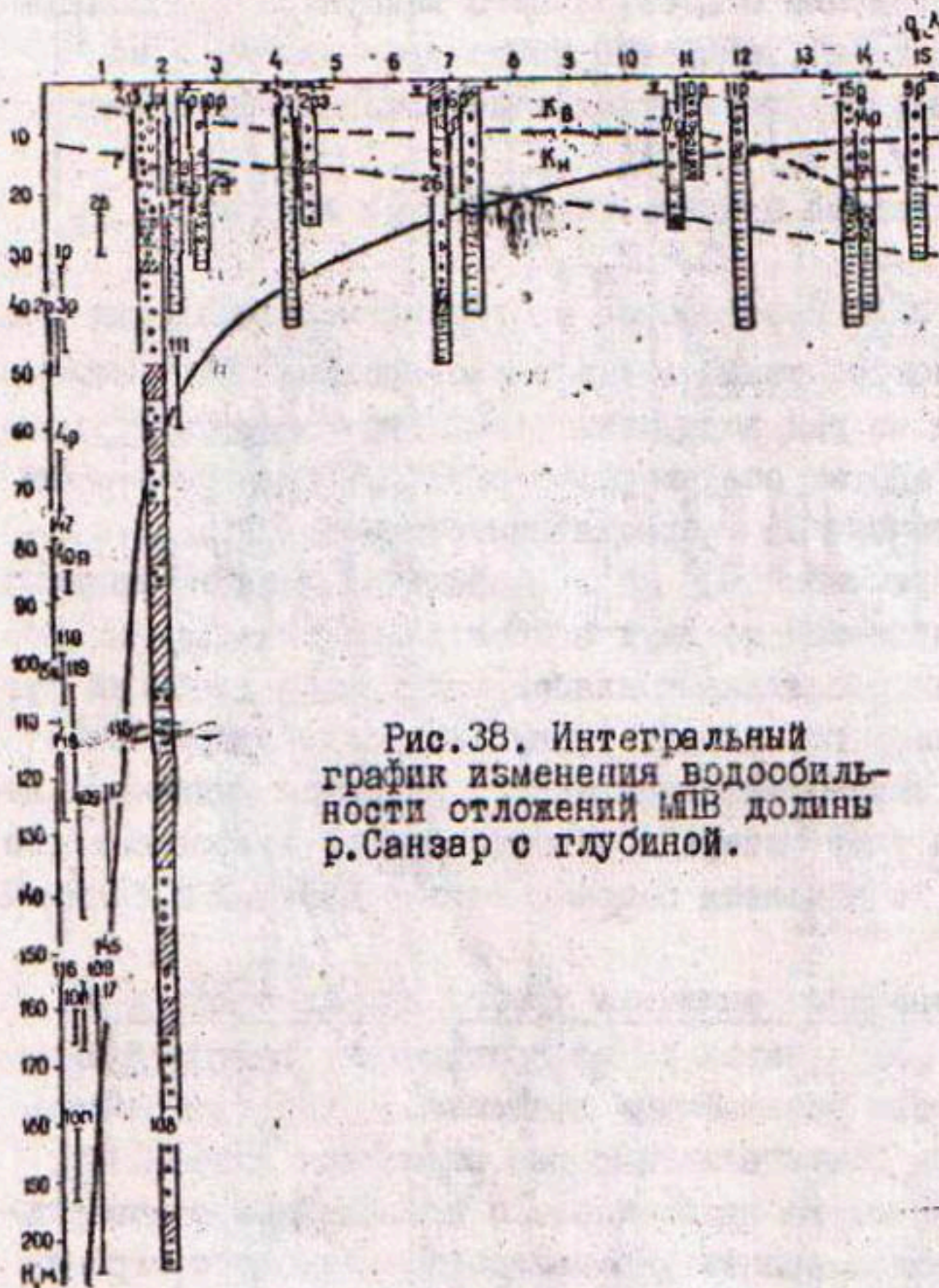


Рис. 38. Интегральный график изменения водообильности отложений МПВ долины р. Санзар с глубиной.

родность пласта в разрезе должна учитываться при оценке эксплуатационных запасов.

2. Особенности распределения геофильтрационных параметров подтверждают выявленные общие закономерности формирования фильтрационных свойств водоносных пластов, которые определяются неотектоникой района в период образования отложений и фазами динамического развития долины. Они отражены в перстративном

облике отложений верхнего слоя (фаза равновесия), перстративно-констративном облике нижнего (равновесно-аккумулятивная фаза) и преимущественно констративном облике подстилающих продуктивный пласт отложений относительного водоупора (преобладание аккумулятивной фазы); наиболее четко проявляющихся на "мешкообразных" участках погружения палеозойского фундамента.

Межгорные впадины (Нуратинское МПВ)

Характеристика МПВ. Нуратинское месторождение подземных вод приурочено к водоносной толще аллювиально-продювиальных отложений, разделяющейся на ряд водоносных комплексов, соответствующих геологическим эпохам осадкообразования: верхнеплиоценовый N_2^3 ; нижнечетвертичный Q_1 , среднечетвертичный Q_{II} , верхнечетвертичный и современный Q_{III-IV} . В пределах каждого водоносного комплекса выделяется до двух относительно выдержанных водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемыми пластами суглинков и алевролитов, но имеющих тесную гидравлическую связь между собой через литологические "окна". Питаются подземные воды, в основном, за счет потерь кратковременного поверхностного стока Биглярская и ряда мелких боковых саев в верхней и средней частях впадины.

Особенности проявления снижения уровня при откачках и их интерпретация. По результатам ранее проведенных опытно-фильтрационных работ по всем разведочным скважинам в пределах месторождения рассчитаны гидрогеологические параметры водоносных комплексов МПВ. Обработка проводилась с применением рационального комплекса методов оценки параметров, позволяющего ограничить разброс цифр и выйти на близкие к достоверным величины параметров опробуемого пласта.

Анализ индикаторных кривых временного прослеживания $S - \lg t$ и выделяемые по ним этапы снижения уровня показывают их принадлежность к водоносному горизонту, близкому к безнапорному. На основании разреза опробуемые горизонты являются квазинапорными с перетеканием через слабопроницаемые разделяющие слои из смежных интервалов при единой неоген-четвертичной водоносной

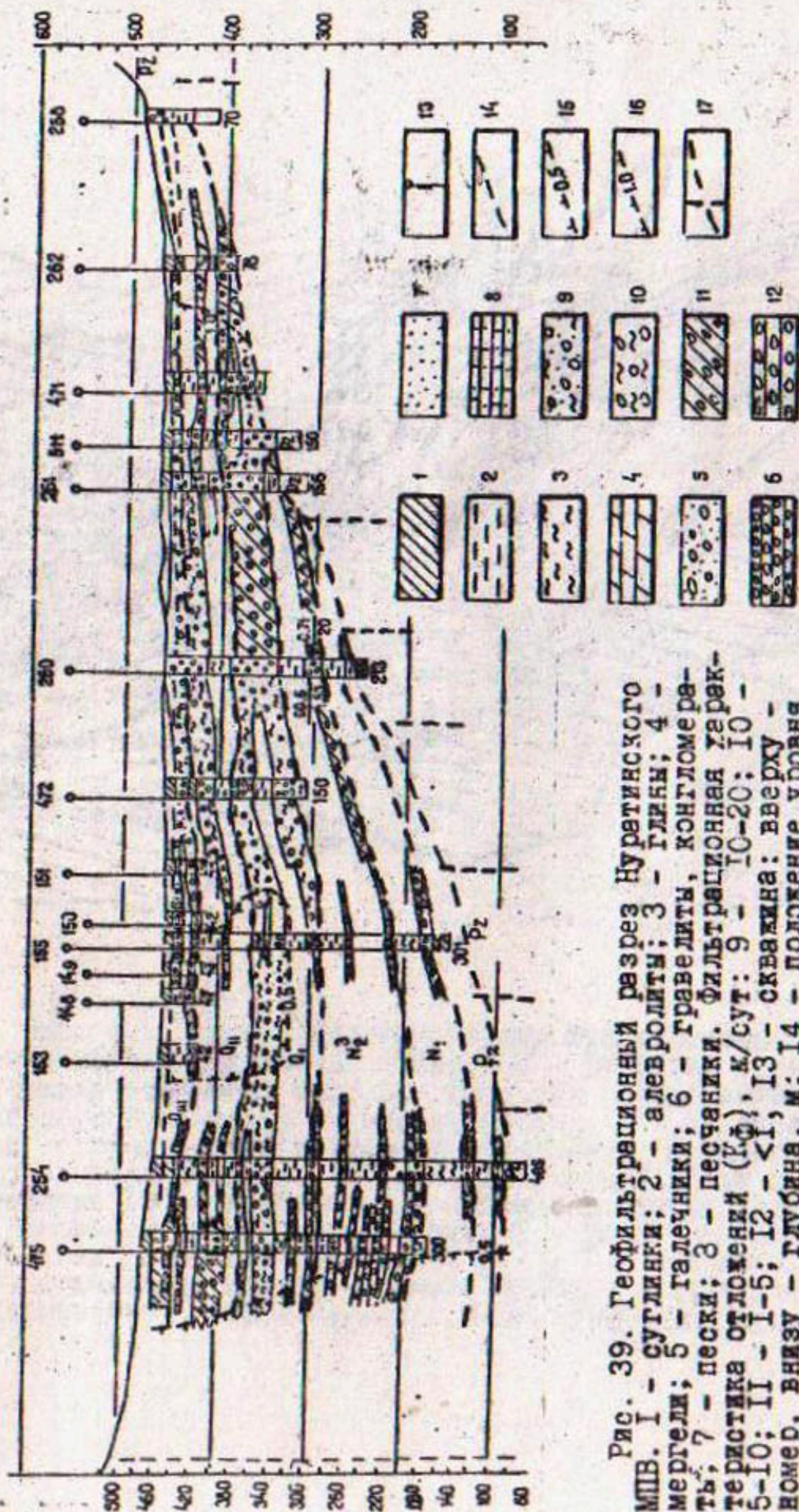
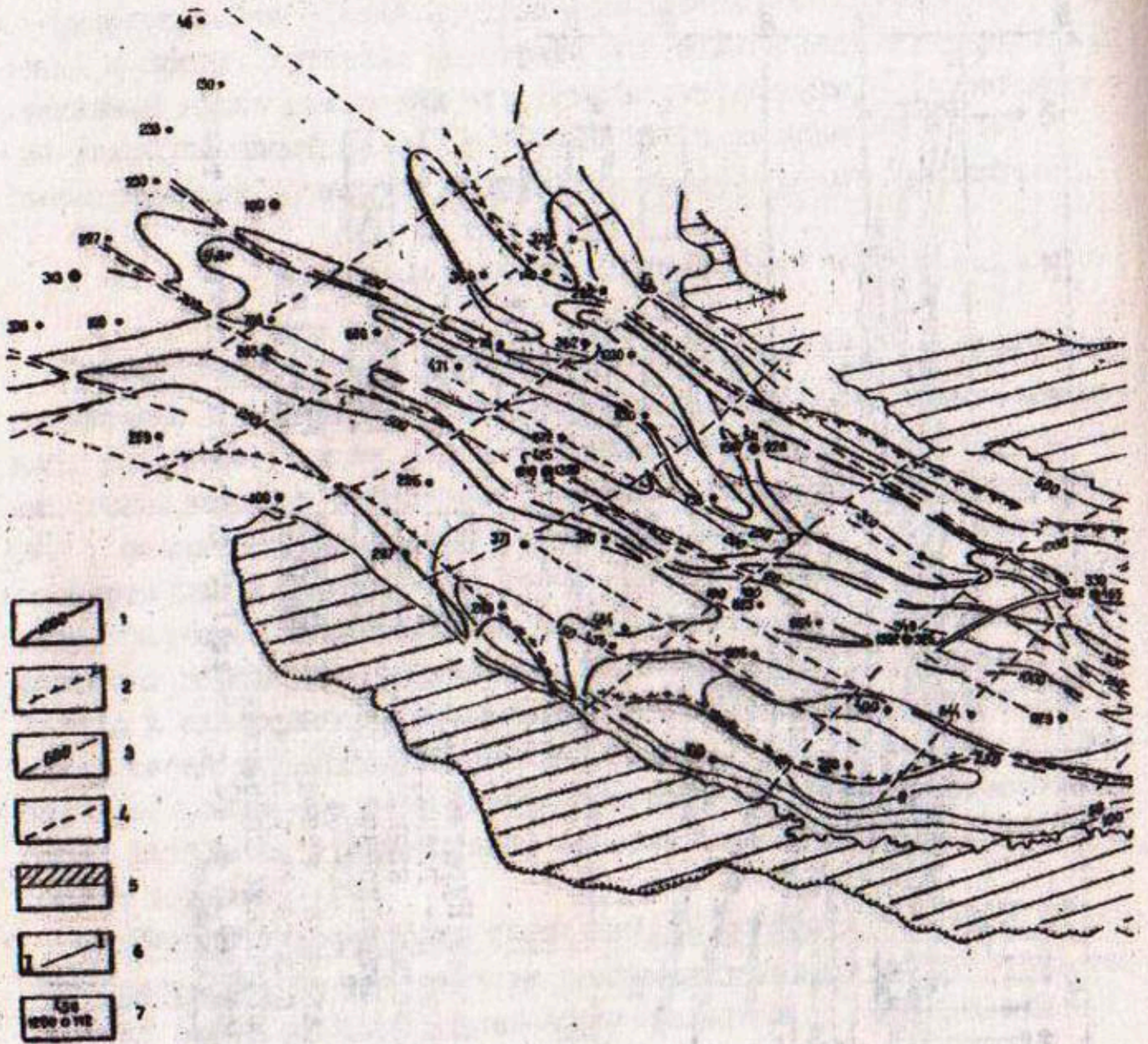


Рис. 39. Геофильтрационный разрез Нуратинского МПВ. 1 - суглинки; 2 - алевролиты; 3 - глина; 4 - мергель; 5 - галечники; 6 - гравелиты, конгломераты; 7 - пески; 8 - песчаники. Фильтрационная характеристика отложений (КФ), м/сут: 9 - 10-20; 10 - 5-10; 11 - 1-5; 12 - <1; 13 - скважина: вверху - номер, внизу - глубина, м; 14 - положение уровня подземных вод от П/З, м. Распространение подземных вод с минерализацией: 15 - менее 0,5 г/л, 16 - менее 1,0 г/л; 17 - линия зон тектонических нарушений (по данным Б.Д. Караева).



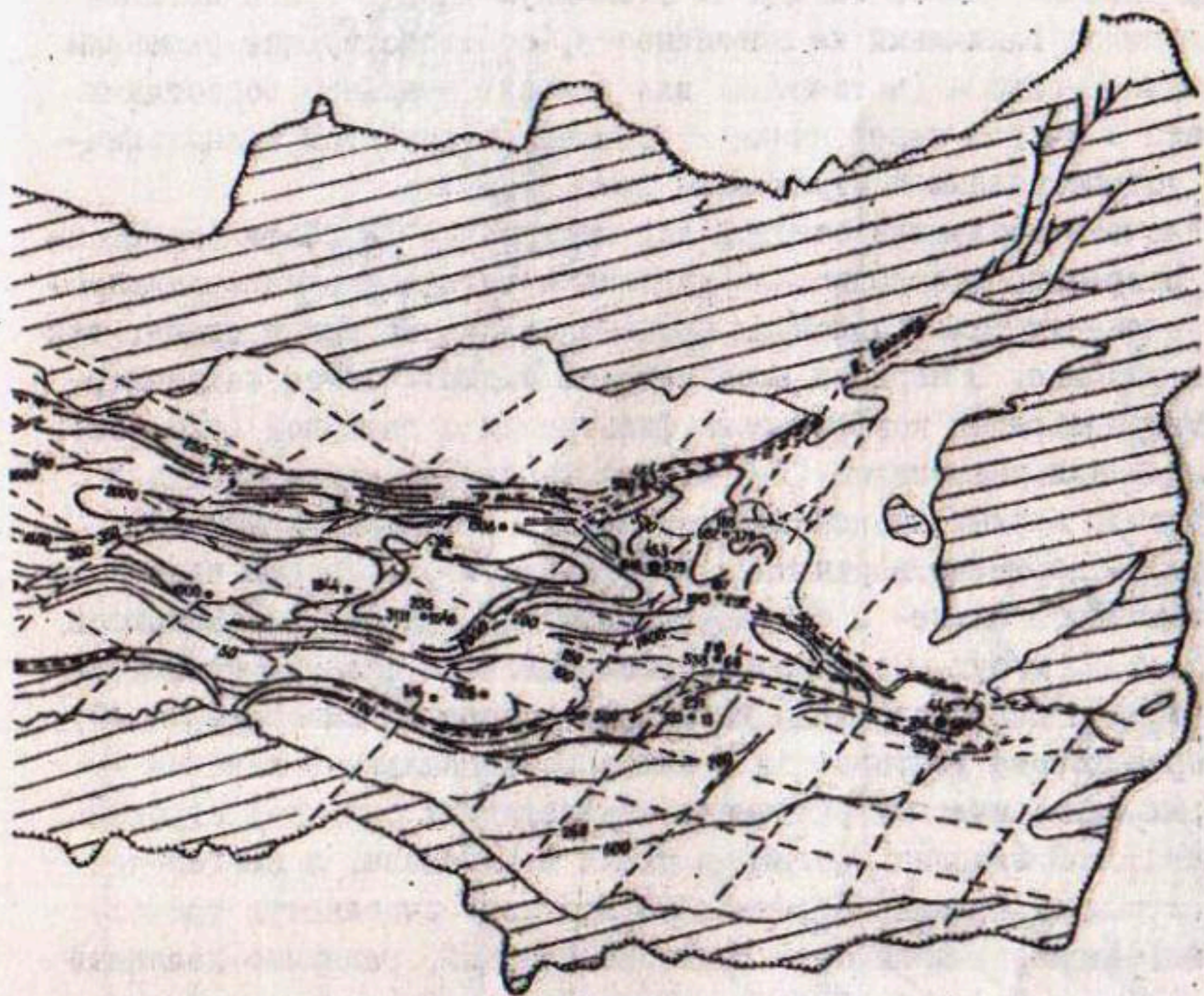


Рис. 40. Схема водопроводимости Нуратинского МПВ. 1 - изолинии водопроводимости, $\text{м}^2/\text{сут}$; 2 - условная граница месторождения подземных вод; 3 - изолинии глубины залегания палеозойского фундамента (в абс. отметках); 4 - предполагаемые линии тектонических нарушений (разломов), активность которых проявлялась в верхнеплиоцен-четвертичные эпохи с амплитудой смещения 100 м и более; 5 - площади развития докембрийских образований горного обрамления; 6 - линии гидрогеологических разрезов (в отчете Комбайской ГГП); 7 - скважины, опробованные откачками: вверху - номер, справа - коэффициент водопроводимости (км), слева - суммарный км , $\text{м}^2/\text{сут}$ (по данным Е.Д. Кереева).

толще МШВ. На всех графиках выделяются четыре характерных этапа. Первые три описываются уравнениями Хантуша-Джейкоба (первый и второй) и Боултона (третий). Однако в конечный период откачки вместо выхода на эталонную кривую Тейса наблюдается выход понижений на зависимости, соответствующие решениям Хантуша-Джейкоба (четвертый) для условий реальной водоотдачи пласта с учетом перетекания из смежных горизонтов и аналогичные установленным и отраженным (рис. 9, 10).

Расчеты послужили основой для построения 12 геофильтрационных разрезов, что позволило увязать и установить закономерности изменения фильтрационных свойств отложений как в плане, так и по глубине. В вертикальном разрезе выдерживается закономерность уменьшения коэффициента фильтрации с глубиной (рис. 39). Наименьшими значениями (1-5 м/сут) характеризуются пласты и горизонты верхнетриасовых отложений, а максимальными (36 м/сут) — верхнечетвертичных. Коэффициенты фильтрации водоносного комплекса нижне- и среднечетвертичных отложений изменяются от 5 до 15 м/сут. Особенности распределения фильтрационных параметров в плане отражены на карте водопроводимости (рис. 40), которая хорошо увязывается с литолого-фациальными поясами и зонами тектонических разломов, определяющих блоковое строение Нуратинской впадины. Согласно схеме В.И.Попова, в неоген-четвертичных отложениях Нуратинской впадины выделяются три основных фациальных пояса — подгорно-веерный, равнинно-долинный и наземно-дельтовый. Подгорно-веерный пояс развит узкой полосой вдоль подножья горного обрамления впадины и сложен породами очень низкой проницаемости. Удельные дебиты скважин менее 0,1 л/с. Зона развития равнинно-долинного пояса характеризуется наибольшей водообильностью и по степени проницаемости отложений здесь можно выделить (рис. 41): аллювиально-пролювиальные преимущественно русловые породы наиболее высокопроницаемые и характеризуются средними величинами электрических сопротивлений (30-60 Ом·м), удельными дебитами скважин более 2 л/с, минерализацией 0,4-0,5 г/л и водопроводимостью 1500-2000 м²/сут и выше; широко развиты в осевой части впадины и разделяются в районе п.Кукчи на несколько рукавов; пролювиально-аллювиальные

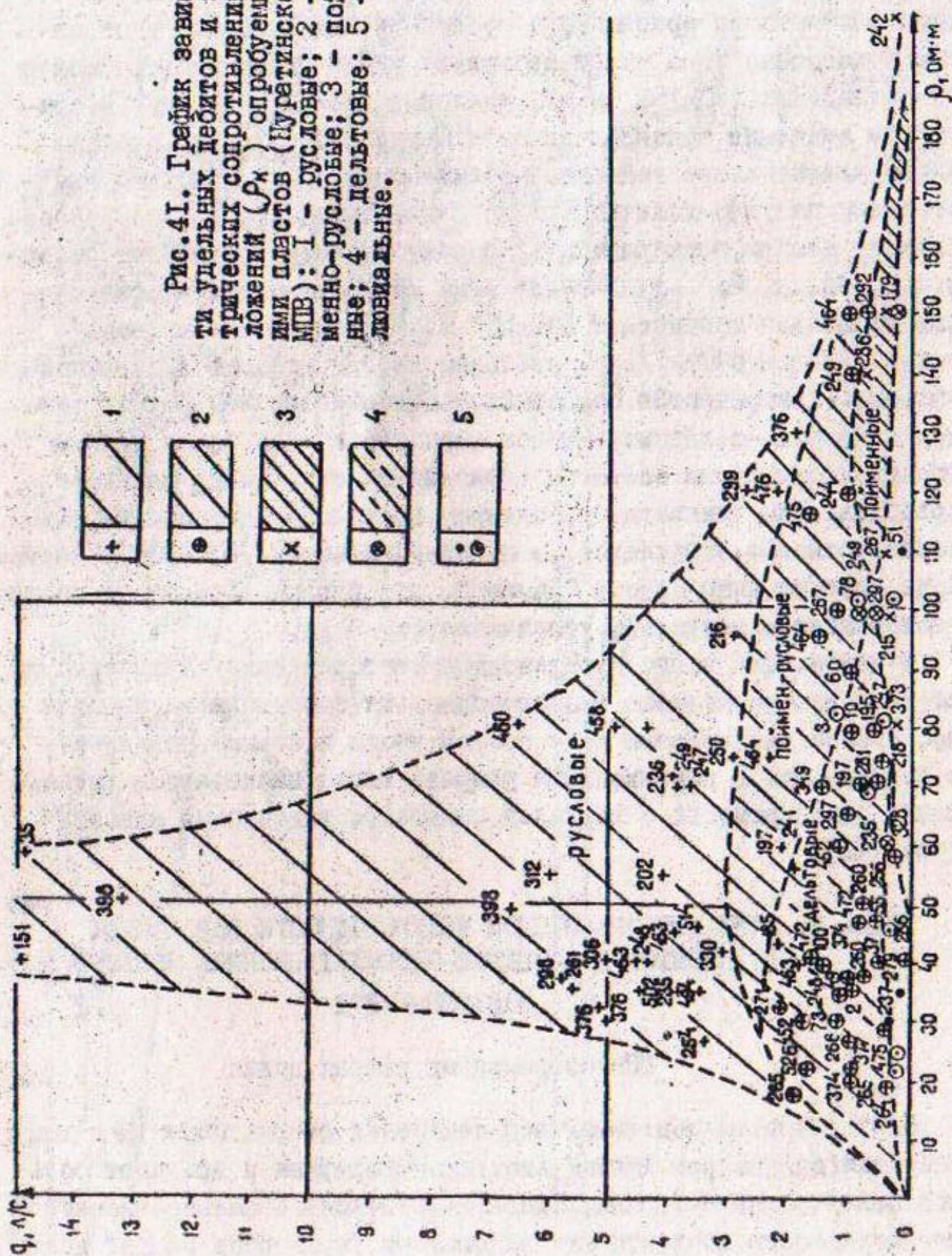


Рис. 41. График зависимости удельных дебитов и электрических сопротивлений отложений (ρ_k) опробуемых ими пластов (Нуратинское МПВ): 1 - русловые; 2 - пойменно-русловые; 3 - пойменные; 4 - дельтовые; 5 - пролювиальные.

пойменные образования с подчиненным развитием локальных по площади и глубине русловых отложений характеризуются наличием в заполнителе галечников глинистых частиц, уменьшающих проницаемость по сравнению с русловыми. Это хорошо проницаемая водоносная зона имеет несколько увеличенные электрические сопротивления (70–150 Ом·м), удельные дебиты – 1–2 л/с и суммарное значение водопроницаемости менее 1000 м²/сут; пролювиально-аллювиальные пойменные отложения высоких паводков представлены валуно-галечниками на глинистом цементе, что определяет их слабую проницаемость; породы развиты в наиболее погруженных блоках Р₂ – фундамента, где мощность неоген-четвертичных отложений составляет 400–500 м. Суммарная водопроницаемость – менее 500 м²/сут, удельные дебиты менее 1 л/с, максимальные электрические сопротивления достигают 200 Ом·м; отложения наземно-дельтового пояса характеризуются более мелким гранулометрическим составом (гравелиты, песчаники, пески) с преобладающим глинистым характером песчаного заполнителя, что соответственно отражается на их проницаемости (200–300 м²/сут). Зона развита ниже створа "Комбай", где ширина водоносной толщи месторождения несколько увеличивается.

В целом, для всего Туратинского месторождения характерно постепенное уменьшение водопроницаемости с востока на запад в продольном направлении и от осевой части к бортам впадины – в поперечном. В вертикальном разрезе также наблюдается уменьшение проницаемости с глубиной залегания водоносных пластов (рис. 42).

ГЛАВА 9. УЧЕТ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

МПВ современных речных долин

Опыт разведки подземных вод межгорных речных долин Центральной Азии (долины рек Чирчик, Ахангаран, Зарафшан и др.) дает большой фактический материал, свидетельствующий о фильтрационной неоднородности продуктивных водоносных горизонтов речных долин

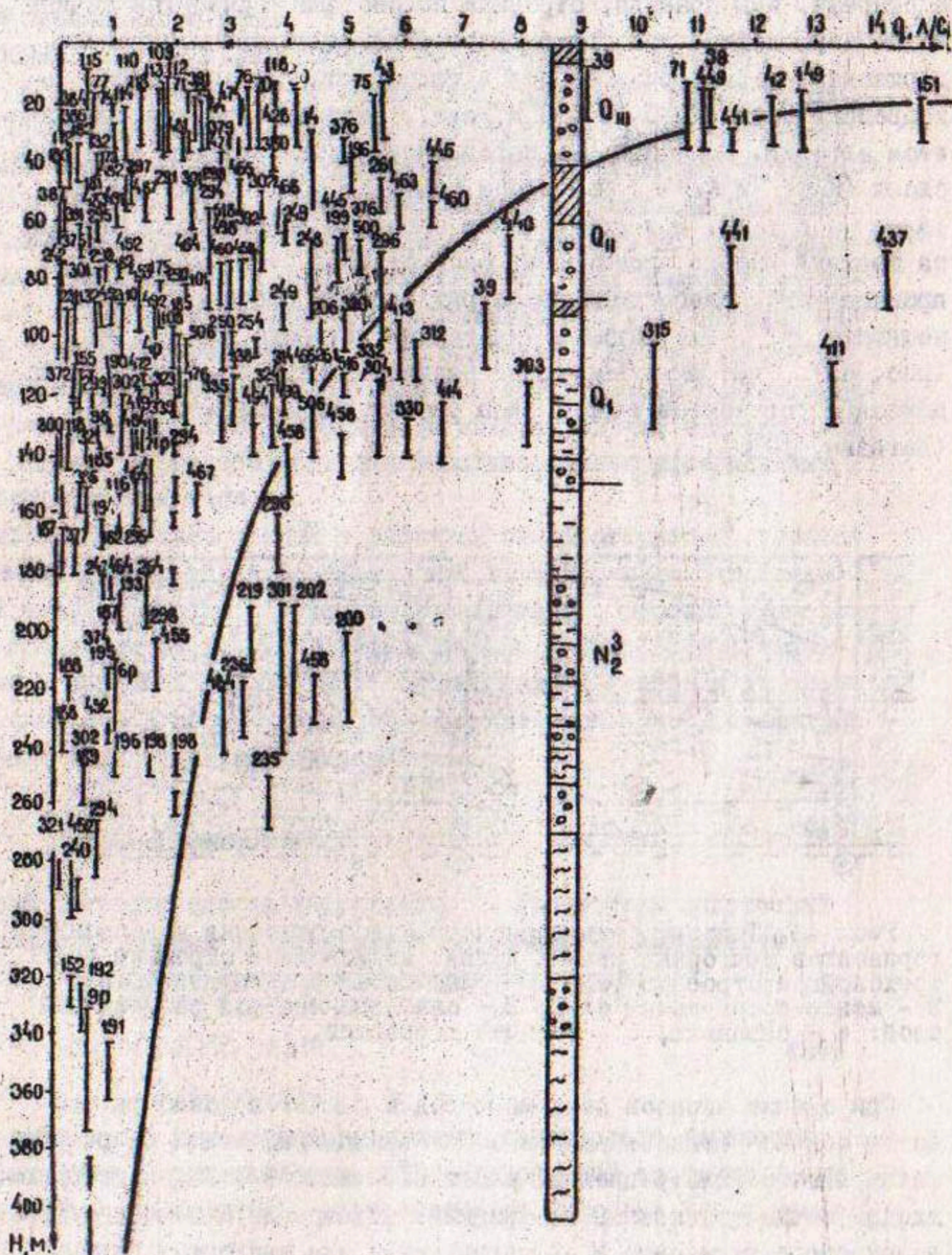


Рис. 42. Интегральный график изменения водообильности отложений Нуратинского МБ с глубиной.

в разрезе. Как правило, строение водоносных горизонтов речных долин двухслойное или трехслойное. При двухслойном строении горизонта, характеризующегося в целом высокими значениями водопроводимости ($1000-10\,000\text{ м}^2/\text{сут}$), наиболее проницаемым является верхний. Коэффициенты водопроводимости верхнего и нижнего слоев (K_1h_1 и K_2m_2) находятся обычно в соотношении $K_1h_1 : K_2m_2 = 5 : 10$. При трехслойном строении водоносного горизонта верхний хорошо проницаемый слой отделен от нижнего, менее проницаемого, слабопроницаемым разделяющим слоем различной мощности m^0 , коэффициент фильтрации которого $K^0 < K_1; K_2$ (рис. 43). Учет фильтрационной неоднородности продуктивных водоносных горизонтов такого типа рассмотрен в работе автора (Нагевич, 1986).

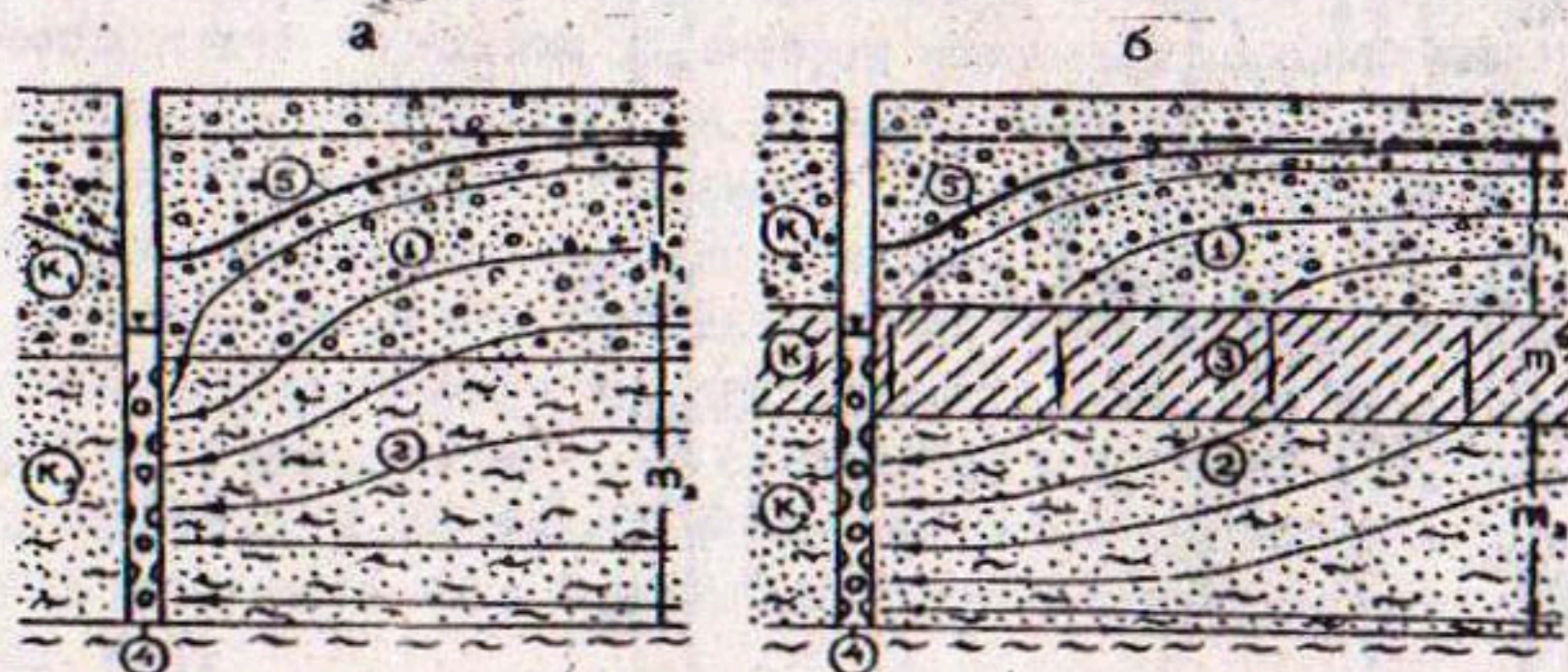


Рис. 43. Типовые фильтрационные схемы строения водоносных горизонтов межгорных речных долин. Двухслойное строение (а); трехслойное строение (б): 1 – слой высокой проницаемости; 2 – менее проницаемый слой; 3 – слабопроницаемый разделяющий слой; 4 – скважина; 5 – воронка депрессии.

При оценке запасов подземных вод в расчет водозабора вводится обычно установленная и обоснованная расчетами по результатам опытно-фильтрационных работ величина $T = KM$, в которую входят средневзвешенный коэффициент фильтрации K и мощность водоносного горизонта M , в характерных для межгорных речных долин безнапорных условиях, равная

$$M = h_1 + m_2, \quad (78)$$

где h_1 — мощность хорошо проницаемого слоя; m_2 — мощность менее проницаемого слоя.

Принимаемая величина расчетного допустимого понижения $S_{\text{доп}} \leq 0,5-0,7 \cdot M$ зачастую значительно превышает мощность хорошо проницаемого слоя $S_{\text{доп}} > h_1$. В этом случае не учитывается, что расход водозабора (скважины) будет обусловлен проницаемостью нижнего слоя, характеризующегося значительно меньшими величинами коэффициента фильтрации по сравнению со средневзвешенным. Такой подход к оценке эксплуатационных запасов грунтовых вод приводит к завышению рассчитанных эксплуатационных запасов и низкой оправдываемости их прогнозов. Здесь в качестве примера можно привести водозаборы Талский в долине р. Ахангаран и Кибрайский в долине р. Чирчик, по которым неучет неоднородности горизонта в разрезе привел к неподтверждению утвержденных эксплуатационных запасов.

Оценим возможные ошибки в расчетах эксплуатационных запасов подземных вод, которые неизбежны при игнорировании фильтрационной неоднородности водоносных горизонтов по вертикали на примере сравнения расчетных дебитов скважин (водозаборов), работающих в условиях двухслойного неоднородного пласта и однородного пласта той же суммарной проводимости при средневзвешенном значении коэффициента фильтрации

$$K_{\text{расч.}} = \frac{T}{h_1 + m_2} \quad (79)$$

и общей мощности пласта $M_{\text{ср}} = h_1 + m_2$. Рассмотрим водоносный горизонт, состоящий из двух слоев различной проницаемости $K_1 > K_2$. Суммарная проводимость горизонта равна:

$$T = K_{\text{расч.}} \cdot M = K_1 h_1 + K_2 m_2, \quad (80)$$

$$K_1 h_1 > K_2 m_2.$$

При опробовании (эксплуатации) такого водоносного горизонта неограниченной протяженности дебит совершенной скважины будет складываться из расходов, притекающих по верхнему Q_1 и нижнему Q_2 слоям

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (81)$$

Приток к скважине при общем для обоих слоев понижении может быть представлен, согласно решениям Льюи, Тейса, в виде

$$Q = \frac{\pi K_1 S (2h_1 - S)}{\ln \frac{R_1}{r_k}} + \frac{2\pi K_2 m_2 S}{\ln \frac{R_2}{r_k}} \quad - \text{установившееся движение,} \quad (82)$$

$$Q = \frac{2\pi K_1 S (2h_1 - S)}{\ln \frac{2.25at}{r_k^2}} + \frac{4\pi K_2 m_2 S}{\ln \frac{2.25at}{r_k^2}} \quad - \text{неустановившееся движение,} \quad (83)$$

где α_1, α_2 - коэффициенты уровнепроводности; S - понижение в скважине; R_1, R_2 - радиусы влияния; r_k - радиус "большого" колодца" скважины.

Допуская $\alpha_1 = \alpha_2$, что соответственно приводит к $R_1 = R_2 = R$, получим

$$Q = \frac{\pi [K_1 (2h_1 - S) S + 2K_2 m_2 S]}{\ln \frac{R}{r_k}}, \quad (84)$$

где $R = 1.5 \sqrt{at}$.

Расход совершенной скважины при том же понижении S , опробующей однородный водоносный горизонт, и тех же суммарной проводимости и коэффициенте фильтрации, осредненным по мощности, можно записать в виде

$$Q_{\text{ср}} = \frac{\pi K_{\text{ср}} S [2(h_1 + m_2) - S]}{\ln \frac{R}{r_k}}, \quad (85)$$

где $K_{\text{ср}} = \frac{K_1 h_1 + K_2 m_2}{h_1 + m_2}$; $R = 1.5 \sqrt{at}$; $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$.

Формула (85) справедлива и для трехслойного горизонта при условии, что $m^0 \ll m_1, m_2$, $K^0 \ll K_1, K_2$. Соотношение дебитов скважин (85 и 84) после сокращения и преобразования приводит к выражению относительной ошибки расчета при применении гипотезы однородности водоносного горизонта в виде

$$\begin{aligned} \frac{Q}{Q_{\text{ср}}} &= \frac{(K_1 h_1 + K_2 m_2) [2h_1 + 2m_2 - S]}{(h_1 + m_2) [K_1 (2h_1 - S) + 2K_2 m_2]} = \\ &= \frac{1 - \frac{S}{2(h_1 + m_2)}}{1 - \frac{S}{2(h_1 + \frac{K_2}{K_1} m_2)}} = \frac{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{S}{M} \right)}{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{S}{M} \right) \left(\frac{M}{h_1 + \frac{K_2}{K_1} m_2} \right)}, \end{aligned}$$

(86)

или $\frac{Q}{Q_{\text{ср}}} = \frac{1 - \bar{S}_{\text{ср}}}{1 - \bar{S}},$

(87)

где $\bar{S}_{\text{ср}} = \frac{S}{2(h_1 + m_2)} = \frac{1}{2} \left(\frac{S}{M} \right);$

$$\bar{S}_n = \frac{S}{2(h_1 + \frac{K_2}{K_1} m_2)} = \frac{1}{2} \left(\frac{S}{M} \right) \left(\frac{M}{h_1 + \frac{K_2}{K_1} m_2} \right).$$

Численный анализ зависимости для различных понижений показывает, что относительное завышение дебита скважины (водозабора) при введении в расчет общей мощности M и средневзвешенного по мощности горизонта коэффициента фильтрации может достигать 100% и более, т.е. дебит скважин, а следовательно, и рассчитанные при отнесении двухслойного водоносного горизонта к однородному эксплуатационные запасы подземных вод могут быть существенно завышены.

Графики зависимости относительной ошибки расчета при принятии гипотезы однородности пласта приведены на рис. 44 в виде зависимостей:

$$\frac{Q}{Q_{\text{ср}}} = f\left(\frac{1 - \bar{S}_{\text{ср}}}{1 - \bar{S}}\right) \quad \text{и} \quad \frac{Q}{Q_{\text{ср}}} = F\left(\frac{h_1 + m_2}{h_1 + \frac{K_2}{K_1} m_2}; \frac{S}{M}\right).$$

Из установленных связей видно, что относительная ошибка значительно зависит от отношения $\frac{S}{h_1 + \frac{K_2}{K_1} m_2}$ и обусловлена рас-

четной мощностью пласта $h_p = h_1 + \frac{K_2}{K_1} m_2$, в которой мощность нижнего, менее проницаемого слоя, приведена к условной мощности этого слоя с коэффициентом фильтрации верхнего.

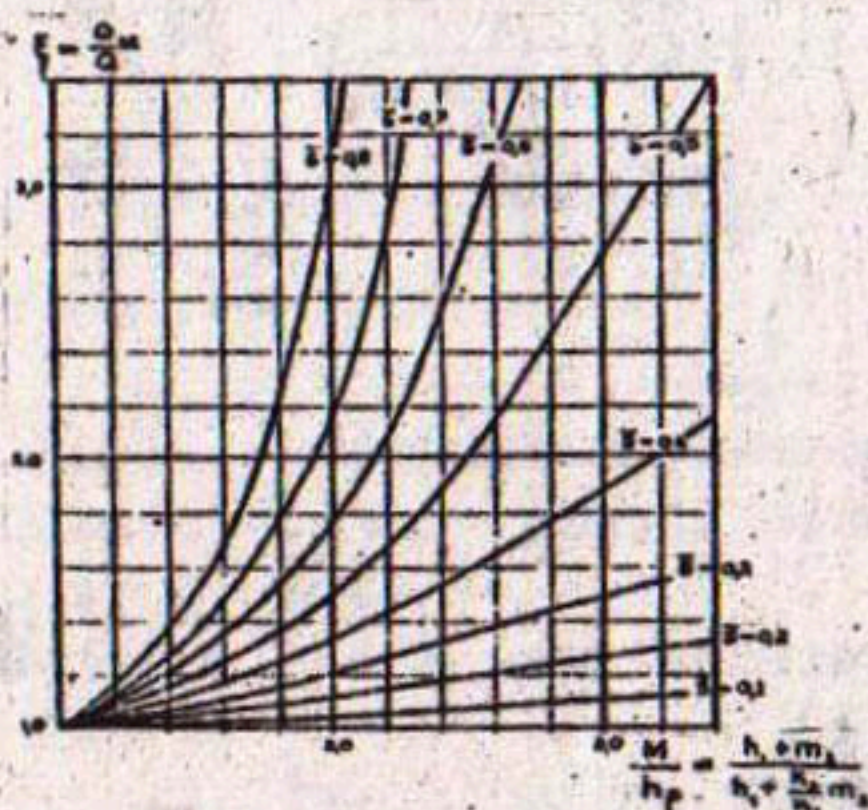


Рис. 44. График зависимости относительной ошибки на неучет неоднородности горизонта в разрезе ε от отношения его общей мощности к приведенной $\frac{M}{h_p}$ и относительного понижения $\bar{S} = \frac{S}{M}$.

транзитом часть расхода из верхнего слоя горизонта.

Таким образом, введение в расчет запасов подземных вод водоносных горизонтов такого типа среднего коэффициента фильтрации и суммарной мощности обоих слоев $K_{cp} = \frac{K_1 h_1 + K_2 m_2}{h_1 + h_2}$; $M = h_1 + m_2$ приводит к завышению допустимого понижения, на котором основаны последующие расчеты эксплуатационных запасов подземных вод, что вызывает их неподтверждение. При $S_{доп} = 0,5-0,7$ м она зачастую значительно превышает мощность верхнего, хорошо проницаемого, слоя $S_{доп} > h_1$, в результате чего расчетные динамические уровни в скважинах располагаются в нижнем, менее проницаемом, слое, не обеспечивая на практике проектных дебитов скважин (водозаборов).

Изложенное подтверждает необходимость введения в расчет экс-

Аналогичные результаты получены автором при решении данной задачи на аналоговой модели. Вне зависимости от положения фильтра в скважине притекающий к ней расход распределяется по доле-вому участию слоев в зависимости $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{K h_1}{K_2 m_2}$ (Нагевич, 1971). Снижение уровня в скважине ниже мощности верхнего, хорошо проницаемого, слоя не дает существенного прироста расхода, который в любом случае будет подчиняться установленной зависимости и приведет только к значительным понижениям в самой скважине. Это вызвано увеличением сопротивления движению воды к фильтру, расположенному в нижнем слое, когда он вынужден пропускать

платационных запасов при такой структуре геофильтрационного разреза приведенной, или виртуальной (Чертков, Ланцман, 1969) мощности.

Анализ показывает, что в процессе разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод межгорных речных долин Центральной Азии необходимо учитывать фильтрационную неоднородность пласта по вертикали. Для этого следует:

1. В процессе разведки подземных вод получить необходимую характеристику о вертикальной фильтрационной неоднородности водоносного горизонта по данным его интервального опробования. Обязательным считается опробование нижнего, менее проницаемого, слоя с оценкой его параметров через понижения в пьезометрах, оборудованных фильтрами на этот же интервал. Для оценки параметров используются методики расчета, основанные на уравнениях теории перетекания (52). Дополнительное оборудование верхнего интервала скважины фильтром и последующее опробование всего водоносного горизонта совершенной скважиной при наличии пьезометров с фильтрами для хорошо проницаемого слоя позволят получить информацию для расчета параметра водоносного горизонта в целом. Расчеты должны вестись на основе зависимостей, выведенных для условий безнапорного водоносного горизонта (63). Полученные параметры Km и α характеризуют весь водоносный горизонт. Располагая сведениями о водопроводимости нижнего слоя, можно получить величину водопроводимости и коэффициент фильтрации верхнего.

2. Расчет эксплуатационных запасов подземных вод (водозабора) следует вести по расчетным зависимостям, учитывающим различие в фильтрационных свойствах слоев конкретного водоносного горизонта. В его основу может быть положена формула, в которую входит расчетная мощность водоносного горизонта:

$$S = h_p - \sqrt{h_p^2 - \frac{Q_{вод}}{\pi K_1} \ln \frac{R}{r_k}} \quad (88)$$

где $h_p = h_1 + \frac{K_2}{K_1} m_2$ - расчетная мощность водоносного горизонта; r_k - радиус "большого колодца", к которому приведена система водозаборных скважин; $Q_{вод}$ - расход водозабора.

Допустимое понижение принимается в виде

$$S'_{\text{дон}} = 0,5 - 0,7 h_p = 0,5 - 0,7 \left(h_1 + \frac{K_2}{K_1} m_2 \right). \quad (89)$$

Аналогичные результаты получаются по формуле

$$Q_{\text{вод}} = \frac{\pi K_1 S_{\text{дон}} (2h_1 - S'_{\text{дон}})}{\ln \frac{R}{r_k}} + \frac{2\pi K_2 m_2 S'_{\text{дон}}}{\ln \frac{R}{r_k}}. \quad (90)$$

Пример расчета. Требуется оценить отбор подземных вод скважиной из двухслойного водоносного горизонта общей мощностью 40 м. Верхний слой (20 м), по данным опытных опробований, характеризуется коэффициентом фильтрации 50 м/сут, нижний слой — 10 м/сут.

1. Исходя из гипотезы однородности пласта при общей мощности водоносного горизонта 40 м величина $S_{\text{дон}}$ составит

$$S_{\text{дон}} = 40 \text{ м} \times 0,6 = 24 \text{ м}.$$

В этом случае расход скважины равен при

$$K_{\text{ср}} = \frac{K m_{\text{об}}}{h_1 + m_2} = \frac{K_1 h_1 + K_2 m_2}{h_1 + m_2} = \frac{50 \cdot 20 + 10 \cdot 20}{20 + 20} = \frac{1200}{40} = 30 \text{ м/сут},$$

$$Q = \frac{\pi K_{\text{ср}} S_{\text{дон}} (2h - S_{\text{дон}})}{\ln \frac{R}{r_k}} = \frac{3,14 \cdot 30 \cdot 24 (80 - 24)}{2,3 \cdot 40} = 13708 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Рассчитаем относительную ошибку ξ , используя графики на рис. 44:

$$\bar{S}_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{дон}}}{2(h_1 + m_2)} = \frac{24}{2 \cdot 40} = 0,3; \quad \bar{S} = \frac{S}{M} = 0,6;$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_n &= \frac{S_{\text{дон}}}{2(h_1 + m_2)} = \frac{24}{2(20 + \frac{10}{50} \cdot 20)} = 0,5; \quad \frac{h_1 + m_1}{h_1 + \frac{K_1}{K_2} m_2} = \\ &= \frac{20 + 20}{20 + \frac{10}{50} \cdot 20} = 1,66: \end{aligned}$$

$\xi = 1,4$. Расчет дает те же результаты —

$$\xi = \frac{1 - \bar{S}_{\text{ср}}}{1 - \bar{S}_n} = \frac{1 - 0,3}{1 - 0,5} = \frac{0,7}{0,5} = 1,4.$$

т.е. дебит скважины завышен на 40% и должен составлять

$$Q = \frac{13708}{1,4} = 9791 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

2. Дебит скважины, рассчитанный по зависимостям (88 и 90), имеет такие же величины.

3. Однако расчет приведен при $S_{\text{доп}} = h_{\text{рас.}}$, что недопустимо. При выборе допустимого понижения исходим из расчетной мощности водоносного горизонта:

$$\begin{aligned} S_{\text{доп}} &= 0,6 \quad h_{\text{расч}} = 0,6 \left(h_1 + \frac{K_2}{K_1} m_2 \right) = \\ &= 0,6 \cdot 24 = 14,4 \text{ м} \approx 15 \text{ м.} \end{aligned}$$

Приняв такое понижение, по зависимостям (88 и 90) получим

$$Q = 8450 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Относительная ошибка в оценке запасов в этом случае достигает 62%.

МПВ погребенных речных долин, конусов выноса
(периферийной части), межгорных впадин

МПВ такого типа характеризуются многослойной структурой геофильтрационного разреза, когда хорошо проницаемые пласты отделены друг от друга слабопроницаемыми разделяющими слоями, через которые они взаимосвязаны между собой. Схематизация такого разреза должна отражать гидрохимические характеристики каждого пласта и толщи в целом и может быть сведена к двум типовым схемам.

При простой гидрохимической обстановке (качество подземных вод по всему разрезу отвечает требованиям для питьевого водоснабжения) водоносная толща приводится к однородному продуктивному горизонту, водопроводимость которого $Km_{\text{пр}}$ равна сумме водопроводимостей всех пластов Km_i

$$Km_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n Km_i. \quad (91)$$

При сложной гидрохимической обстановке (качество подземных вод не отвечает требованиям, как правило, в пластах верхней части водоносной толщи) необходимо привести разрез к двум гори-

зонтам, которые взаимодействуют через слабопроницаемый разделяющий слой. Водопроницаемость горизонтов складывается из суммы водопроницаемостей каждого слагающего его пласта, а интенсивность их взаимодействия в процессе эксплуатации нижнего горизонта (перетекание вод некондиционного качества из верхнего) обусловлена коэффициентом фильтрации и мощностью разделяющего слоя.

Схематизация геофильтрационного разреза такого типа изложена в работах (Боревский и др., 1989; Плотников, 1985).

Здесь уделим внимание только слабоизученному процессу взаимодействия верхнего и нижнего горизонтов при эксплуатации нижнего через прослеживаемые в разделяющих слоях разрывы сплошности или так называемые литологические "окна". Роль их в гидрогеологических процессах очень велика. Они, в основном, определяют гидродинамическую структуру потока подземных вод и его качественную характеристику как в естественных условиях, так и при эксплуатации, определяя прогнозные величины понижения уровня и минерализации подземных вод.

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод (ЭЗПВ) в слоистых толщах запасы схематизируются в условно однородный напорный пласт (горизонт), характеризующийся суммарным коэффициентом водопроницаемости всей толщи. Положение "окна" в верхнем слое соответствует фактическому, но не отражает сложный путь движения от него к водозабору и не позволяет выявить реальную роль в формировании ЭЗПВ. В этом случае с погрешностью оценивается как количественная, так и качественная сторона процесса. Выяснение роли "окна" при моделировании вызывает необходимость решения ряда тестовых и инверсных задач, что требует больших затрат времени на итерационный поиск его, адекватных природным, физическим характеристикам.

Аналитическое решение этого вопроса и раскрытие принципа учета литологических "окон" при оценке ЭЗПВ позволяет упростить как процесс моделирования многослойных систем, так и повысить достоверность прогнозов. Взаимодействие водоносных горизонтов через разделяющие слои рассматривается в работах Ф.М.Бочевера, Н.Н.Веригина, Л.В.Гохберга, Т.К.Слепцова, М.С.Хантуша. В них анализируются различные случаи влияния литологических "окон". В частности, Ф.М.Бочевер (1979) приводит решение

для двухслойной толщи с литологическим "окном" полосообразной формы, аналогичное уравнению для однослойного неоднородного пласта. В работе В.В.Баши (1987) обоснованы постановка и численный метод решения задачи на ЭВМ для "окон" в многослойной среде. Отметим, что роль "окон" с позиции сложного взаимодействия внутри многослойной системы не рассматривалась. Этот вопрос проанализирован в работе автора (Нагевич, 1989) на примере действия линейного водозабора подземных вод (подземной галереи). В основу учета "окон" положен метод фильтрационных сопротивлений, с помощью которого описано движение подземных вод с обеих сторон, в т.ч. и со стороны "окна". Рассмотрен и наиболее характерный случай сложного пути движения подземных вод к водозабору со стороны верхнего и внутреннего "окна" (рис. 45).

Соотношение расходов, притекающих к водозабору с каждой стороны, определено выражением:

$$\frac{q_{\text{в0}}}{q_{\text{вп}}} = \frac{\Delta H_{\text{в0}}}{\Delta H_{\text{вп}}} \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_{\text{пi}}}{\sum_{i=1}^n \Phi_{\text{лi}}} = \frac{(H_0 - H_{\text{в}})}{(H_{\text{п}} - H_{\text{в}})} \frac{\left(\frac{L_{\text{п1}}}{K m_{\text{п}}} + \frac{L_{\text{п2}}}{K m_{\text{п}}} + \dots + \frac{L_{\text{пn}}}{K m_{\text{п}}} \right)}{\left(\frac{L_{\text{л1}}}{K m_{\text{л}}} + \frac{L_{\text{л2}}}{K m_{\text{л}}} + \dots + \frac{L_{\text{лn}}}{K m_{\text{л}}} + \frac{m}{K L_0} + \frac{m}{K L_0''} \right)} \quad (92)$$

Изложенный принцип позволил получить обобщенный коэффициент фильтрации отложений "окна":

$$K_{\text{об}} = \frac{m^0}{L_0 \left(\sum_{i=1}^n \frac{L_{\text{лi}}}{K m_{\text{л}}} + \frac{m'}{K' L_0'} + \frac{m^0}{K'' L_0''} \right)} \quad (93)$$

Условные обозначения к зависимостям (92, 93) даны на рис. 45.

Так как горизонтальные сопротивления при близких фильтрационных характеристиках пласта и "окна" на несколько порядков выше вертикальных, они, в основном, определяют величину сопротивления верхнего "окна". Поэтому обобщенный коэффициент фильтрации "окна" при переходе к однослойной схеме будет на несколько порядков ниже истинного. Предварительный расчет обобщенного коэффициента фильтрации "окна" позволяет существенно ускорить итерационный процесс при решении обратных задач на математических моделях. Он также может быть использован и при аналитических расчетах водозаборов в качестве обобщенного фильтрационного показателя разделяющего слоя.

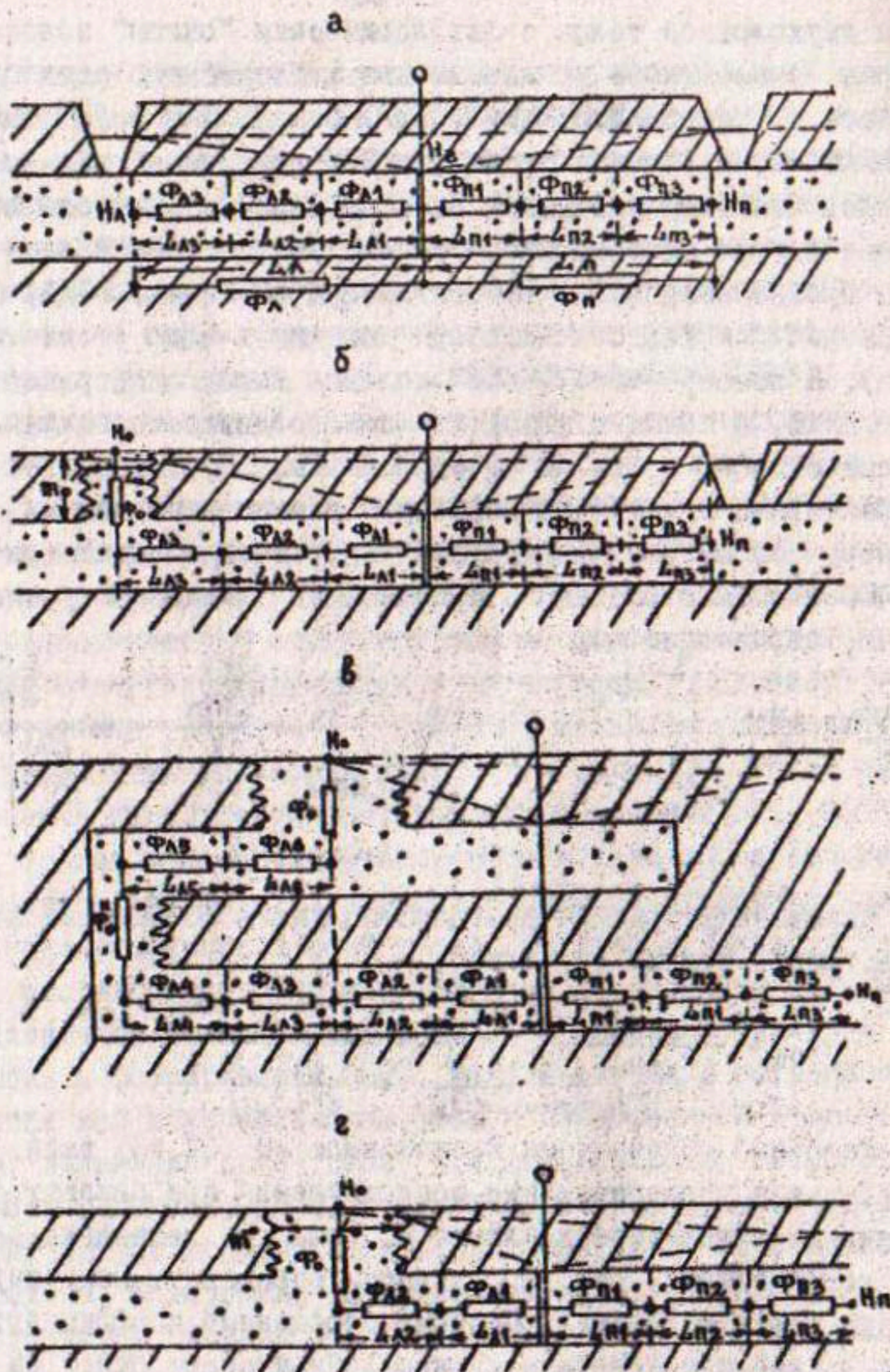


Рис. 45. Схема к учету "окон": а — однослойная без "окон"; б — однослойная с "окном"; в — двухслойная с внутренним "окном"; г — однослойный вариант с "окном" схемы в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетняя практика эксплуатации подземных вод показала, что оценка геофильтрационных параметров водоносных пластов по результатам опытно-фильтрационных работ (откачек) - имеет важное значение при решении проблемы питьевого водоснабжения. Эффективность отбора подземных вод обуславливается достоверностью оцененных на стадии изысканий (разведки) геофильтрационных параметров пласта.

Формальный подход к проведению и интерпретации результатов откачек, который преобладал в последние десятилетия на практике и с которым, в основном, связаны отдельные неудачи разведочной гидрогеологии, показал свою несостоятельность. Однако его критика не изменила отношения к интерпретации ОФР как к творческому процессу, о чем постоянно высказывались ведущие гидродинамики (Б.В. Боровский, В.А. МIRONENKO, В.М. Шестаков, Л.С. Язвин и др.). С огромным значением они придавали уровню квалификации и интуиции гидрогеолога-исследователя, возможностям осмысления исполнителем собственного опыта и знаний.

Возможно, что эти тезисы частично удалось реализовать автору при подготовке данной монографии. Это позволило по-новому представить отдельные нюансы гидродинамических процессов, возникающие при откачке из совершенных скважин, опробующих водоносные пласты различного типа, учесть выявленные особенности путем внесения поправок в фундаментальные зависимости Тейса, Хантуша, Боултона, обосновать рациональный комплекс методов оценки реальных параметров опробуемых пластов, установить механизм процесса формирования фильтрационных свойств флювиальных отложений. Однако, несмотря на то, что имеющаяся на настоящий момент теоретическая база позволяет при обработке результатов ОФР быть уверенными в реальности параметров на 80-90%, остается еще много вопросов, требующих пристального внимания. К их числу, наиболее полно способствующих решению задач водоснабжения населения Республики Узбекистан в XXI веке, можно отнести:

составление программного обеспечения и автоматизации расчета гидрогеологических параметров на ПЭВМ, в основу которых

должны быть взяты изложенные в данной работе особенности гидродинамических процессов с максимальным использованием уже имеющихся достижений в этой области (программа "Гидпар" и др.);

детализация процессов формирования фильтрационных свойств флювиальных отложений с учетом основных факторов и пространственной характеристики фильтрационных параметров основных продуктивных горизонтов эксплуатируемых МПВ;

получение универсальных теоретических решений, описывающих работу несовершенных скважин в неоднородных в разрезе безнапорных водоносных горизонтах;

обоснование теоретических решений, учитывающих неравномерное распределение напоров по длине фильтра (от забоя к насосу), которое приводит к аналогичному их распределению и в самом водоносном горизонте, что зачастую связывают с фильтрационной неоднородностью пласта;

изучение и оценка фильтрационных сопротивлений и, соответственно, распределения напоров в цепочке "скважина-фильтр-прифильтровая зона - водоносный горизонт" с учетом конструктивных особенностей скважины и способа ее бурения;

разработка решений, направленных на получение реальных параметров разделяющих слабопроницаемых слоев при опробовании водоносной толщи, состоящей из водоносных пластов различной проницаемости и имеющих разные напоры.

Вслед за В.А.Мироненко и В.М.Шестаковым следует повторить высказанные ими два десятилетия назад положения "о необходимости увеличения точности и информативности ОФР посредством качественного улучшения их технологической основы", имея ввиду "повышение качества бурения и оборудования опытных скважин, ... внедрения новых контрольно-измерительных устройств...", что должно способствовать и "повышению общей культуры ведения ОФР".

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Абуталлиев Ф.Б., Баклушин М.В., Ербеков Я., Умаров У.У. Эффективные приближенно-аналитические методы для решения задач теории фильтрации. – Ташкент: Фан, 1978. 244 с.
- Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – М.: Недра, 1982. 408 с.
- Бэдов В.В., Киселев А.А. Модели геофильтрации (Обзор ВИЭМС: "Гидрогеология и инж. геология". М., 1984. 51 с.
- Баша В.В., Капорин И.Е. Численное решение задач фильтрации в тонких слоистых средах с выклиниванием слабопроницаемых слоев. Рациональное использование водных ресурсов // Вопросы обоснования гидрогеол. и водохоз. прогнозов. – М.: Наука, 1987.
- Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. – М.: Недра, 1979. 313 с.
- Боревский Б.В. Закономерности формирования эксплуатационных запасов месторождений пресных подземных вод // Водные ресурсы, 1985, № 2.
- Боревский Б.В., Дробноход И.Н., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод. – Киев: Выща школа, 1989.
- Бородин Р.В. Подземные воды межгорной долины р. Ангрен // Тр. СамГУ, 1960. Вып. 173.
- Бородин Р.В. Методика проведения опытных откачек в условиях неустойчившегося движения подземных вод // Тр. ТашГУ, 1961. Вып. 180. С. 165–175.
- Бородин Р.В. Определение условий эксплуатации ограниченного по ширине потока грунтовых вод при неустойчившемся режиме // Тр. ТашГУ. 1961. Вып. 180. С. 175–189.
- Бородин Р.В. Количественные категории подземных вод // Тр. ТашГУ, 1963, № 220. С. 209–237.
- Бочеввер Ф.М., Лапшин Н.Н. К вопросу о гидрогеологических расчетах водозаборных скважин в слоистых толщах // Тр. ВНИИ ВОДГЕО. М., 1969. Вып. 22.
- Бочеввер Ф.М. и др. Основы гидрогеологических расчетов. – М.: Недра, 1969. 368 с.

Бочеввер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Б. Защита подземных вод от загрязнения. – М.: Недра, 1979.

Бэр Я., Заславский Д., Ирмей С. Физико-механические основы фильтрации воды. – М.: Мир, 1979.

Веригин Н.Н., Васильев С.В., Саркисян С.В. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. – М.: Недра, 1977. 271 с.

Веселова В.Л., Раткович Г.Д. Численно-аналитические решения для линейных и радиальных одномерных в плане многопластовых потоков // Применение методов матем. моделирования для решения гидрогеол. задач / Тр. ТашГУ, 1987.

Веселова В.Л., Язвин А.Л. Опыт определения геофильтрационных параметров слоистых толщ (на примере Душанбинского МПВ) // Мат-лы XV научн. конф. молод. ученых МГУ. М., 1988.

Водоватова З.А., Гохберг Л.К., Семенова-Ерофеева С.М. и др. Методика обоснования региональных гидрогеологических моделей многослойных систем. – М.: Недра, 1982. 147 с.

Гавич И.К. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод методом моделирования. – М.: ВИЭМС, 1972. 96 с.

Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. – М.: Недра, 1980.

Ганиев К.Г. Испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод. – Ташкент: Фан, 1979, 212 с.

Грикевич Э.А. Гидравлика водозаборных скважин. – М.: Недра, 1986.

Дамберг Э.И. Использование данных гидродинамики при поисках нефти и газа. – М.: Недра, 1985. 150 с.

Де Уист Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши. – М.: Мир, 1969.

Джоган Л.Я. Испарение с орошаемых полей Средней Азии // Водные ресурсы, 1989, № 3. С. 41–48.

Дзюльките О.А. Программная система для автоматизированного определения геофильтрационных параметров по данным опытно-фильтрационных работ ГИДПАР / описание применения/. – Вильнюс: Ин-т математики и кибернетики АН Лит.ССР, 1982. 29 с.

Дзюльките О.А. Применение решений в интегральных изображениях при обработке на ЭВМ данных опытных откачек // Водные ресур-

сы, 1986, № 2. С.20-31.

Елисеев В.И. Закономерности образования проливия. - М.: Недра, 1978.

Карташов И.П. Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран //Тр. ГИИ АН СССР. - М.: Наука, 1972. Вып. 245.

Кожевников А.В. Антропоген гор и предгорий. - М.: Недра, 1985.

Концебовский С.Я., Минкин Е.Л. Гидрогеологические расчеты при использовании подземных вод для орошения. - М.: Недра, 1989, 253 с.

Костенко Н.П. Геоморфологический анализ речных долин горных стран (на примере Киргизстана) //Бюлл.комиссии по изучению четвертичного периода, 1958, № 22.

Костюкович П.Н. Гидрогеологические основы вертикального дренажа. - Минск: Наука и техника, 1979, 288 с.

Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации. - М.: Недра, 1986.

Магара К. Уплотнение пород и миграция флюидов. - М.: Недра, 1982, 296 с.

Минкина Е.Л. Гидрогеологические расчеты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод. - М.: Недра, 1967. 124 с.

Мирзаев С.Ш. Запасы подземных вод Узбекистана. - Ташкент: Фан, 1974, 224 с.

Мирзаев С.Ш. Научные основы рационального использования управления и охраны подземных вод //Гидрогеол. проблемы рационального использования подземных вод/ Тр.ГИДРОИНГЕО. - Ташкент: САИГИМС, 1989. С.5-8.

Мирзаев С.Ш., Саидмурадов З.С. Обоснование многоцелевого использования подземных вод аридной зоны. - Ташкент: Фан, 1991. 116 с.

Мироненко В.А., Сердюков Л.И. Сработка результатов опытных откачек, проведенных в условиях двухслойной толщи //Разведка и охрана недр, 1968, № 10.

Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. - М.: Недра, 1974.

Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. - М.: Недра, 1978.

Мироненко В.А., Ломакин Е.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. - М.: Недра, 1988.

Моркос Н.З., Мунукьян Д.А. Методика определения гидрогеологических параметров двухслойной среды по данным опытных работ //Разведка и охрана недр, 1968, № 10.

Нагевич П.П. О некоторых особенностях величины сопротивления русла в долинах горных рек /Тр.ТашГУ, 1971. Вып. 407. С.216-223.

Нагевич П.П. К расчету коэффициентов фильтрации при откачках из несовершенных скважин в двухслойном пласте /Тр. ТашГУ, 1971. Вып. 415. С.99-112.

Нагевич П.П. К вопросу определения величины сопротивления русловых отложений в межгорных речных долинах //Вопросы методики и результаты изучения запасов ПВ /Тр. ГИДРОИНГЕО, Ташкент: САИТИМС, 1980. С.26-35.

Нагевич П.П. К вопросу гидрогеологической эффективности искусственного пополнения запасов подземных вод межгорных речных долин / Тр.ТашГУ, 1981. Вып. 651. С.21-30.

Нагевич П.П., Анкудович Д.М., Бушмакин Н.И. К расчету гидрогеологических параметров по результатам эксплуатации подземных вод артезианских бассейнов /Тр.ТашГУ, 1981. С.36-43.

Нагевич П.П., Юнусходжаев А.Т. Математическое моделирование гидрогеологических процессов /Мат-лы II Всес. семинара: Тез. докл. М., 1981. С.110.

Нагевич П.П., Вартельский В.И. Пути повышения достоверности гидрогеологических прогнозов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод межгорных речных долин /Мат-лы I Всесоюз. гидрогеог. конф. - М.: Наука, 1982. Т. 2. С.81-84.

Нагевич П.П. К расчету достоверных значений гидрогеологических параметров пласта по результатам опытного опробования приречных скважин //Методы анализа и обработки гидрогеологических данных для прогноза ресурсов подз. вод. - Таллин: Изд-во АН ЭССР, 1984. С.153-161.

Нагевич П.П., Анкулович Д.М., Бушмакин Н.И., Сергеева Е.В. Прогноз изменения напоров термоминеральных вод Приташкентского

артезианского бассейна под влиянием эксплуатации /Тр. ТашГУ, 1984. Вып. 725. С.6-12.

Нагевич П.П. К вопросу расчета гидрогеологических параметров методами Джейкоба /Тр.ТашГУ, 1984. Вып.725. С.50-56.

Нагевич П.П. К расчету достоверных гидрогеологических параметров по данным кустовых откачек из слоистых водоносных толщ //Вопросы гидрогеологии аридной зоны / Тр.ГИДРОИНГЕО. Ташкент: САИГИМС, 1984. С.14-25.

Нагевич П.П. К вопросу оценки геофильтрационных параметров водоносных горизонтов /Мат-ды I Научно-практ.конф. "Рациональное использование и охрана родных ресурсов в Ниж.Поволжье": Тез.докл. Саратов, 1986. С.26-28.

Нагевич П.П. Учет фильтрационной неоднородности водоносных горизонтов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод речных долин //Ресурсы подземных вод и их охрана от истощения и загрязнения/ Тр.ГИДРОИНГЕО. - Ташкент: САИГИМС, 1986.

Нагевич П.П. К вопросу расчета геофильтрационных параметров водоносных горизонтов межгорных речных долин //Поиски, разведка, охрана и использование подземных вод/ Тр.ГИДРОИНГЕО. - Ташкент: САИГИМС, 1987. С.33-39.

Нагевич П.П., Бушмакин Н.И., Сергеева Е.В. Опыт оценки эксплуатационных запасов подземных вод Голодной степи методом моделирования //Применение методов математического моделирования для решения гидрогеологических задач/. Тр. ТашГУ, 1987. С.32-38.

Нагевич П.П., Прошин Д.М. Учет литологических "окон" в разделяющих слоях при моделировании многослойных систем // Подземные воды /гидроминеральные ресурсы, разведка и охрана/ Тр.ГИДРОИНГЕО. Ташкент: САИГИМС, 1989. С.4-10.

Нагевич П.П., Прошин Д.М., Сулейманов М.М. К вопросу обоснования оптимального отбора подземных вод слоистых пластов в сложных гидрохимических условиях //Гидрогеологические проблемы рационального использования подземных вод/ Тр. ГИДРОИНГЕО. Ташкент: САИГИМС, 1989. С.98-100.

Нагевич П.П. О некоторых особенностях расчета гидрогеологических параметров по данным ОФР из приречных скважин // Гидрогеологические проблемы рационального использования подземных

вод/ Тр.ГИДРОИНГЕО. - Ташкент: САИГИМС, 1989. С.78-82.

Нагевич П.П., Вартельский В.И., Пономарев В.Н., Сидоренко В.Ф. Техногенез при эксплуатации пресных подземных вод системой крупных водозаборов //Техногенные изменения гидрогеологических условий/ - М.: Недра, 1989. С.227-247.

Нагевич П.П. К вопросу интерпретации данных ОФР в безнапорных водоносных горизонтах //Проблемы гидрогеологических исследований в аридной зоне/ Тр.ГИДРОИНГЕО. - Ташкент: САИГИМС, 1991. С.6-14.

Нагевич П.П., Сергеева Е.В. Некоторые особенности распределения геофильтрационных свойств водоносных горизонтов речных долин (на примере р.Чирчик) //Проблемы гидрогеологических исследований в аридной зоне/. Тр.ГИДРОИНГЕО. - Ташкент: САИГИМС, 1991. С.14-24.

Нагевич П.П., Сергеева Е.В. К вопросу типизации водоносных горизонтов при интерпретации ОФР //Поиски, разведка и ресурсы подземных вод// Тр.ГИДРОИНГЕО. - Ташкент: Узбекгидрогеология, 1993. С.20-29.

Нагевич П.П. Об универсальности отдельных уравнений геофильтрации, используемых при интерпретации опытных откачек // Поиски, разведка и ресурсы подземных вод/ Тр.ГИДРОИНГЕО. - Ташкент: Узбекгидрогеология, 1993. С.9-20.

Нагевич П.П. К вопросу формирования фильтрационных свойств водоносных горизонтов флювиальных неоген-четвертичных отложений //Геологик жараёнлар эволюцияси ва фойдали казилмалар/ Тр.ТашГУ, 1995. С.112-116.

Нагевич П.П. К вопросу предварительной оценки емкостных показателей водоносных пластов по косвенным признакам // Гидрогеологические исследования в Узбекистане / Тр. ГИДРОИНГЕО. - Ташкент: Узбекгидрогеология, 1995.

Невечера И.К., Авилина И.В. Определение параметров трехпластового потока по данным опытно-фильтрационных работ/ Мат-лы ХУ научн.конф. молодых ученых. - М.: МГУ, 1986.

Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. - Новосибирск: Наука, 1983. 241 с.

Плотников Н.И. Эксплуатационная разведка подземных вод. - М.: Недра, 1979. 272 с.

Плотников Н.И. Поиски и разведка пресных подземных вод. - М.: Недра, 1985. 368 с.

Плотников Н.И. Техногенные изменения гидрогеологических условий. - М.: Недра, 1989.

Плугина Т.А. Определение геофильтрационных параметров слабопроницаемых отложений натурными методами / Обзор ВИЭМС: "Гидрогеология и инж. геология". - М., 1978. 55 с.

Пономарев В.Н. Формирование эксплуатационных запасов подземных вод межгорных орошаемых речных долин. - Ташкент: Фан, 1989.

Попов В.И. Фациальное развитие осадков горных и предгорных пустынных равнин // Матер. по четвертичному периоду СССР. - М.: Изд-во АН СССР, 1950. Вып. 2. С.192-205.

Попов В.И. и др. Руководство по определению осадочных фациальных комплексов и методика фациально-палеогеографического картирования. - Л.: Гостоптехиздат, 1963. 713 с.

Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны. - М.: Недра, 1972.

Сергеев В.В., Пономарев В.Н. Гидрогеологическое обоснование охраны грунтовых вод речных долин. - Ташкент: Фан, 1991. 144 с.

Справочник по инженерной геологии под ред. М.В.Чуринова. - М.: Недра, 1968.

Хантуш М.С. Анализ данных опытных откачек из скважин в водоносных горизонтах с перетеканием // Вопросы гидрогеол. расчетов. - М., 1964.

Ходжибаев Н.Н., Самойленко В.Г. Гидрогеолого-мелиоративные прогнозы. - Ташкент: Фан, 1976. 360 с.

Чеботарева О.В. Определение гидрогеологических параметров и расчеты водозаборов в двухслойных горизонтах: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Ташкент, 1993.

Чепмен Р.Б. Геология и вода. - Л.: Недра, 1983. 160 с.

Чертков Л.М., Ланцман Л.Б. Исследование фильтрации воды в двухслойной среде методом гидравлических аналогий // Вопросы гидрогеологии и инж. геологии Украины. - Киев: 1969. Вып. 2. С.103-106.

Чистяков А.А. Горный аллювий. - М.: Недра, 1978.

Шестаков В.М., Башкатов Д.И. Опыт-но-фильтрационные работы. - М.: Недра, 1974.

Шестаков В.М. Оценка инерционности современной пьезометрической скважины в напорном пласте // Экспресс-информация ВИЭМС: "Гидрогеология и инж. геология", 1981. Вып. 2.

Шестаков В.М. Методика обработки опытных откачек вблизи водотоков ограниченной ширины // Разведка и охрана недр, 1983, № 6.

Шестаков В.М. Интерпретация опытных откачек при перетекании между пластами // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология, 1983. № 6.

Шестаков В.М., Азарова Т.В. Дифференциальные способы обработки данных опытных откачек для основной схемы перетекания // Экспресс-информация ВИЭМС: "Гидрогеология и инж. геология", 1986, № 8.

Шестаков В.М. Оценка параметров сжимаемости и упругости пород. - М.: Инженерная геология, 1991, № 4.

Шестаков В.М., Невечеря И.К., Скворцова Е.А. Интерпретация опытных откачек у реки в двухслойном пласте // Разведка и охрана недр, 1991, № 10.

Штенгелов Р.С. Балансовая структура эксплуатационных запасов подземных вод // Водные ресурсы, 1978, № 2. С. 101-110.

Штенгелов Р.С. Формирование и оценка эксплуатационных запасов пресных подземных вод. - М.: Недра, 1988. 232 с.

Boulton N.S. Analysis of data from non-equilibrium pumping test allowing for delayed yield from storage. "Proc. Inst. Civil. Eng.", 1963, N 26, p. 169-182.

Bruce Hunt. Calculation of the leaky aquifer function. "J. of Hydrology", 1977, vol. 33, N 1/2, p. 179-183.

Case C.M., Addiego J.C. Note on a series representation of the leaky aquifer well function. "J. of Hydrology", 1977, vol. 32, N 3/4, p. 393-397.

Chander S., Kapoor P.N., Goyal S.K. Analysis of pumping test data using Marquardt algorithm. Ground Water, 1981, vol. 19, N 13, p. 275-278.

Dumly O. Determination of uniform and granular aquifer characteristics by linear methods. Hydrology science Bul., 1977, vol. 22, N 3.

Enlig C., Halepaska J.C. A numerical study of confined-

unconfined aquifer including effects of delayed yield and leakage. Water Resour. Res., 1976, vol. 12, N 6.

Johnson M.L. The transition problem in pumped aquifers. Water Resour. Res., 1979, vol. 15, N 5, p. 1266-1272.

Hantush M.S. Hydraulic of wells. Advances in Hydrosience, New York, 196., vol. 1.

Herrera I., Minzoni A., Flores F.Z. Theory of flow in unconfined aquifers by integrodifferential equations. Water Resour. Res., 1978, vol. 14, N 2, p. 291-297.

Kadi A.J., Brutsaert W. Can unsaturated flow during drainage be represented by Boulton's formulation. Water Resour. Res., 1986, vol. 22, N 10.

Kruseman G.P., Ridder N.A. Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for land Reclamation, Wageningen, 1970.

Moench A.F., Prickett T.A. Radial flow in an infinite aquifer undergoing conversion from artesian to water table conditions. Water R.Res., 1972, N 2.

Mucha J., Panlikova E. Pumping test using large diameter production and observation wells. Journal of Hydrology, 1986, vol. 89, N 1/2.

Neuman S. Theory of flow in Unconfined - Aquifers considering delayed gravity response. Water Resour. Res., vol. 8, N 4, 1972, p. 1031-1045.

Neuman S. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers. Water Resour. Res., 1975, vol. 11, N 2, p. 329-342.

Nwankwor G.J., Cherry J.A., Gillham R.W. A comparative study of specific yield determinations for a shallow sand aquifer. Ground Water, 1984, vol. 22, N 6, p. 764-772.

Prickett T.A. Type - curve solution of aquifer tests under water table conditions. Ground Water, 1965, vol. 3, p. 5-14.

Rushton K.R., Chan V.K. Numerical pumping test analysis in unconfined aquifer. J. of the Irrig. and drain. div., 1977, vol. 103, N 1R1, p. 1-12.

Sepylveda N., Zack A.L. The effects of overburden stress on the specific storage and hydraulic conductivity of artesian aquifers. *Journal of Hydrology*, 1991, vol. 128, N 1-4.

Walton W.C. Comprehensive analysis of Water - table aquifer test data. *Ground Water*, 1978, vol. 16, N 5, p. 311-317.

Yotov I.G. Flow to wells near streams in the presence of delayed yield from storage and analysis of pumping test data. *Ground Water*, 1973, vol. 11, N 4, p. 42-45.

Zen Z. Determination of aquifer parameters by the slope-matching method. *Ground Water*, 1986, vol. 24, N 2, p. 217-223.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение	3
Глава 1. Условия формирования фильтрационных свойств водоносных толщ месторождений подземных вод во флювиальных отложениях	7
Глава 2. Структура формирования расходов откачки из водоносных горизонтов различного типа	17
Глава 3. Обзор методов оценки параметров, основные рас- четные схемы и современные рекомендации по об- работке данных опытно-фильтрационных работ (ОФР)	25
Состояние изученности вопроса	25
Краткий обзор методик оценки параметров для различных схем и рекомендаций по их исполь- зованию	27
Глава 4. Оценка степени отражения в расчетных зависимос- тях и методиках основных факторов, определяющих ход снижения уровня при откачках, и способы их учета	48
Составляющие понижения уровня воды при ОФР ..	48
Влияние геостатического давления на состоя- ние водоносного пласта и степень его упру- гости	54
Типизация водоносных горизонтов по характеру упругости пласта	65
Роль динамичности подземных вод в пласте и ее отражение в расчетных зависимостях	70
Обоснование расчетных зависимостей, отражаю- щих состояние упругости пласта и динамичности подземных вод в пласте	79
Роль граничных и начальных условий пласта в плане и разрезе и их отражение в расчетных зависимостях	92
Глава 5. Особенности проявления снижения уровня при от- качках и требования к методике их обработки ...	110

Универсальная теоретическая зависимость для описания хода снижения уровня при ОФР	110
Требования к рациональному комплексу методов оценки параметров по данным ОФР.....	114
Примеры расчета параметров по данным ОФР....	124
Глава 6. Уточнение геофильтрационных параметров по данным эксплуатации водозаборов подземных вод	134
Теоретические основы оценки гидрогеологических параметров по результатам эксплуатации..	134
Требования к анализу результатов эксплуатации водозаборов подземных вод и обоснованию выбора способов расчета гидрогеологических параметров	138
Результаты расчета гидрогеологических параметров по данным эксплуатации месторождений	141
Глава 7. Основные требования к проведению опытно-фильтрационных работ (ОФР).....	167
Глава 8. Геофильтрационная структура основных типов МПВ Узбекистана	172
Широкие речные долины (р.Чирчик).....	172
Узкие речные долины (р.Санзар).....	180
Межгорные впадины (Нуратинское МПВ).....	184
Глава 9. Учет фильтрационной неоднородности водоносных горизонтов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод	190
МПВ современных речных долин.....	190
МПВ погребенных речных долин, конусов выноса (периферийной части), межгорных впадин....	199
Заключение.....	203
Использованная литература.....	205

Павел Павлович Нагевич

Формирование и оценка фильтрационных
свойств водоносных толщ

Утверждено к печати
Ученым советом Института ГИПРОИНГЕО

Редактор Л.И. Ежова
Техн. редактор Т.Г. Кочергина
Корректор Е.П. Мясоедова
Редактор-машинистка Р.И. Булатова

Подписано в печать 14.08.1998 г. Формат 60 x 84_{1/16}.

Усл.-печ. л. 13,8.

Уч.-изд. л. 12,0.

Тираж 100 экз.

Заказ 119

Типография ГИТИ,
Ташкент, ул. Алмазар, 171.